

Päällysteiden pintakarkeuden vaikutukset tien käyttäjiin ja tienpitoon

Päällysteiden pintakarkeuden vaikutukset tien käyttäjiin ja tienpitoon

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2010

Kannen kuvat: Sauli Sainio

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-001-9

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 020 637 373

Päällysteiden pintakarkeuden vaikutukset tien käyttäjiin ja tienpitoon. Liikennevirasto, tieosasto. Helsinki 2010. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2010, 76 sivua ja 8 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-001-9.

Asiasanat: päällysteet, suunnittelu, pinnan karkeus, mittaus, rengas, kitka, melu, vierintävastus, polttoaineen kulutus, makrokarkeus, megakarkeus

Tiivistelmä

Päällysteiden pintakarkeuksia mitataan kolmen eri tunnusluvun avulla. Useimmiten tunnusluvut jaetaan käsitteisiin mikrokarkeus, makrokarkeus ja megakarkeus. Mikrokarkeus on päällysteen kivirakeiden pinnan epätasaisuutta ja se vaikuttaa renkaan ja päällysteen välisen kitkan muodostumiseen kasvattaen sitä. Mikrokarkeus on toivottava ominaisuus, koska se parantaa kitkaa ja sen arvo saisi olla mahdollisimman suuri. Mikrokarkeutta ei pystytä vielä mittaamaan kovin luotettavasti nopeilla mittausmenetelmillä.

Makrokarkeus on päällysteen kivirakeiden ja renkaan kumipalojen mittakaavassa olevaa pinnan epätasaisuutta ja se vaikuttaa kitkaan, meluun ja vierintävastukseen. Makrokarkeutta mitataan sekä RMS- että MPD-arvoina. Sen vaikutus rengasmeluun on kahdensuuntainen. Lyhyen aallonpituusalueen makrokarkeus parantaa päällysteen meluominaisuuksia, koska se mahdollistaa ilman liikkumisen renkaan ja päällysteen kosketuspinnassa ja pienentää siten suuritaajuisia melua. Pitemmän aallonpituusalueen makrokarkeus kasvattaa melua, koska suuremmat epätasaisuuden aiheuttavat lisää värähtelyä renkaan ja päällysteen kontaktipinnassa. Näiden kahden aallonpituusalueen välinen raja on 10–20 mm. Useimmiten suositellaan 10 mm rajaa. Makrokarkeuden ja melun välisestä riippuvuutta kuvattaessa käytetään usein MPD-arvoa, mutta myös RMS-arvoa on käytetty. MPD-arvon on todettu vaikuttavan suurilla nopeuksilla myös kitkaan, koska se kasvattaa renkaan ja päällysteen pinnan välisiä hystereesivoimia. Makrokarkeuden on todettu lisäävän myös renkaan vierintävastusta ja kasvattavan siten polttoaineen kulumusta.

Megakarkeus on edellisiä suuremman aallonpituusalueen karkeutta ja sitä luonnehditaan usein tien epätasaisuudeksi. Se huomioi niitä päällysteen pinnassa olevia lyhytaaltoisia epätasaisuuksia kuten nypytyä, halkeamia, reikiä, sillan liikuntasauvoja jne., joita epätasaisuusmuuttujassa, IRI, ei huomioida. Se vaikuttaa vierintävastukseen, meluun, kitkaan ja ajoneuvon kulumiseen sekä kasvattaa raskaiden ajoneuvojen tiehen aiheuttamaa dynaamista rasitusta. Sen suuria arvoja tulee välttää. Sen vaikutusten on raportoitu olevan samansuuruisia kuin makrokarkeudella tai epätasaisuudella (IRI).

Päällysteen karkeustiedon merkitystä on selvitetty karkeuteen ja sen vaikutuksiin liittyvien mekanismien kautta. Makrokarkeuden kehittymistä mekanismina on käsitelty eniten. Suomessa käytettyihin maanteiden päällysteisiin liittyy sellainen ominaisuus, että päällysteiden makrokarkeus (RMS) on alussa suurta ja pienenee päällysteen ikääntyessä. Makrokarkeus on keskimäärin suurempaa ajourissa kuin niiden välissä.

Makrokarkeuteen liittyy aallonpituusalueen ja siinä vallitsevan amplitudin lisäksi sen suuntaa kuvaava ominaisuus niin, että pintatasosta alaspäin suuntautuvaa karkeutta sanotaan negatiiviseksi ja ylöspäin suuntautuvaa karkeutta sanotaan positiiviseksi. Negatiivinen karkeus on suositeltavaa erityisesti melun kannalta, koska rengas synnyttää siinä vähemmän melua. Lisäksi se vaimentaa syntynyttä melua. Karkeuden suuntaa pystytään mittaamaan käyttämällä makrokarkeuden MPD- ja RMS-tunnuslukuja samanaikaisesti laskemalla niiden suhteellista eroa. Tämän selvityksen kaksi pääasiallista löytöä ovat makrokarkeustunnuslukuun tarvittavat muutokset. Se tulisi jakaa aallonpituusalueeltaan kahteen osaan 10 mm:n kohdalla ja siitä tulisi mitata molemmat tunnusluvut (MPD ja RMS), joiden avulla saadaan laskettua kolmas tunnusluku, suunta. Muutoksista seuraa kuitenkin se, että makrokarkeuden kehittymiseen ja vaikutusten määrittämiseen tarvitaan mittauksia ja tutkimusta ennen kuin sen täysimittaista hyödynämistä voidaan tarkemmin ohjeistaa.

Megakarkeus on ominaisuus, joka pysyy päällysteen elinkaaren ajan melkein vakiona. Alemmalla tieverkolla se kasvaa hiukan tien ikääntyessä. Megakarkeuteen vaikuttaa siten päällystystyön onnistuminen. Megakarkeus on yleensä suurempaa ajourissa kuin ajourien välissä.

Päällystesuunnittelussa on hallitsevana Suomessa urautumiskestävyys, koska henkilöautoissa käytetään talviaikaan nastoja. Päällystemassojen koostumuksen määräävät juuri urautumiskestävyteen liittyvät ominaisuudet kuten esim. 16 mm maksimiraekoko. Vilkasliikenteisten teiden melutasot ovat taajama-alueilla melko suuria ja melulle altistuukin maanteiden varsilla noin 350 000 henkilöä. Melulle altistuvien määrästä tehdyt laskennalliset haittakustannukset ovat noin 120 M€ vuodessa. Suomessa on kehitetty vähemmän melua tuottavia päällysteitä ja niillä onkin saatu aikaan noin 3 dB:n vähenemä melutasoissa.

Tieliikenne käyttää polttoaineenaan pääosin uusiutumattomia luonnonvaroja. Maanteiden liikennesuorite on noin 35 Mrd.ajonkm vuodessa ja siinä kulutetaan noin 3900 milj.littraa polttoainetta. Uusiutumattomien luonnonvarojen väheneminen ja ilmastonmuutos pakottavat suunnittelemaan kaikkea toimintaa siten, että niitä säästettäisiin mahdollisimman paljon. Myös tienpidossa ollaan kehittämässä käytäntöä niin, että pystyttäisiin säästämään luonnonvaroja ja saastuttamaan vähemmän. Tämä tarkoittaa mm. että päällysteiden ylläpidossa huomioidaan melu, turvallisuus ja polttoaineen kulutus aiempaa paremmin. Päällysteitä tulee suunnitella siihen suuntaan, että niiden aiheuttama melu ja vierintävastus ovat pienempiä.

Vierintävastuksia on selvitetty sekä laboratoriokokeilla että kenttämittauksilla. Päällysteen pinnan ominaisuudet voivat pahimmillaan kaksinkertaistaa vierintävastuksen. 10 %:n muutos vierintävastuksessa aiheuttaa henkilöautojen polttoaineen kulutukseen noin 2 %:n ja raskaiden autojen kulutukseen noin 3-6 %:n lisän. Yhden millimetrin lisäys karkeuksien RMS-arvoissa aiheuttaa keskimäärin 12.4 %:n lisäyksen vierintävastuksiin. Päällysteen karkeuden vaikutus henkilöauton polttoaineen kulutuksessa on noin 0.26 litraa/100km. Tutkimusten vaikutusarviot kuitenkin vaihtelevat melko paljon.

Karkeuden hallintaa esitetään kehitettäväksi uudistamalla tunnuslukuja ja parantamalla niiden mittaamista, luokittelemalla ja ohjeistamalla niiden käyttöönottoa. Lisäksi esitetään jatkotutkimusehdotuksia karkeuden vaikutusten täsmentämiseksi Suomen olosuhteisiin. Hienoa makrokarkeutta tulisi maksimoida ja megakarkeutta minimoida. Karkean makrokarkeuden suhteen tulee mitata sen molemmat tunnusluvut ja tehdä niiden avulla laskennallinen, suuntaa kuvaava muuttuja, jonka käyttäytymisestä tulee hakea kokemuksia ja lisätietoa. Hienolle makrokarkeudelle ja megakarkeudelle voidaan tehdä kuntoluokitus ja raja-arvot. Karkean makrokarkeuden luokitusta tai raja-arvoja voidaan määrittää vasta lisätutkimusten jälkeen.

Karkeuden hallinnan askeleet ovat karkeustiedon hankinta, karkeuden vaikutusten ja syy-seuraussuhteiden tutkiminen ja karkeusnäkökulman painoarvon nostaminen päällystesuunnittelussa.

Vägytans texturens inverkan på trafikanter och underhåll. Trafikverket, vägavdelningen. Helsingfors 2010. Trafikverkets undersökningar och utredningar 1/2010, 76 sidor och 8 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-001-9.

Sammanfattning

Textur av vägytan är definierad enligt ISO-definitionen till tre olika variabler (mikro-, makro och megatextur) som täcker längsgående våglängderna 0.001-0.5 mm, 0.5-50 mm, och 50-500 mm. I Finland har textur data av vägytor samlats in tillsammans med spår- och jämnhetsmätningar. Den årliga mätningens volymen har varit cirka 30 000 km. Texturvariabler har beräknats som RMS-värden.

Vägytans mikrotextur är en användbar egenskap därför att den förbättrar friktionen mellan bil- däck och vägytan. Men den är inte av så stor betydelse på finska vägytor därför att största delen av personbilarna i Finland har dubbdäck. Vägytorna slits under vintern och det minskar poleringen.

Makrotexturen har många effekter, den förbättrar friktionen men ökar rullmotståndet. Makro- texturen av korta våglängden dämpar bullret medan texturen av långa våglängden ökar bullret. Makrotexturen av lång våglängd skulle undvikas. Det skulle vara nyttigt att fördela makro- texturen på två olika variabler med våglängdens gränsvärde 10 mm. Texturen med korta våglängden (0.5-10 mm) kunde benämnas fin makrotextur och texturen med långa våglängden (10-50 mm) kunde benämnas grov makrotextur. I många undersökningar om makrotextur har man mätt antingen i RMS-värde eller MPD-värde men sällan båda. RMS-värdet är inte så känsligt mot riktnings av texturen medan MPD-värden är det. Riktning av texturen är positiv när $MPD > RMS$ och negativ när $MPD < RMS$. Negativ riktning är en önskad egenskap och positiv riktning en oönskad egenskap. Nya vägytor har negativ riktning i textur. Negativ riktning i vägytans textur har många positiva egenskaper; det är mjukt av åka på, det har låg bullernivå och hög friktion. Sannolikt är också rullmotståndet lågt. I Finland ändras vägytornas riktning av textur från negativ till positiv inom ganska kort tid. Det skulle vara nyttigt att mäta båda värden, MPD och RMS, och att göra en beräknad variabel som anger riktnings av textur.

Megatextur av vägytan är ojämnheter i våglängden 50-500 mm. Den ökar rullmotståndet och slitage av bilen och däck och är därför en oönskad egenskap hos vägytan. Originalvärden av megatextur beror på beläggningens kvalitet och den består av åren. Värdena över 1.0 mm är höga värden. Beläggningens skador, hål osv. ökar megatextur.

Finska beläggningar för högtrafikerade vägar har mest beläggningstypen SMA 16 eller AB 16 som har maximal kornstorlek av 16 mm. Planering av beläggningar grundar sig på hög spår- bildning och textur av beläggningar har inte beaktats. Man har mätt texturdata men mätningarna har inte utnyttjats. Den här undersökningen försöker att lyfta fram den här synpunkten. Texturdata av beläggningar har potentiella utnyttjingsmöjligheter och borde mätas och användas också vidare. Den mest akuta behovet är att börja mäta texturen med rätta variabler (fin och grov och riktning). Den andra saken är att börja undersöka hur olika beläggningstyper, trafiken och tiden påverkar riktnings av textur. Den tredje saken är att mäta rullmotståndet, buller och friktion mellan olika textur och börja beräkna hur stor ekonomisk nytta det skulle vara att ta hänsyn till textur i beläggningsplaneringen.

Det skulle också vara viktigt att delta mera i internationella undersökningar.

The Effect of Road Texture on Road Users and Road Maintenance. Finnish Transport Agency, Road Department. Helsinki 2010. Research reports of the Finnish Transport Agency 1/2010. 76 pages and 8 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-001-9.

Keywords: pavement, planning, texture, measurement, tire, friction, noise, fuel, consumption

Summary

Texture of road pavement is defined according to the ISO-definition in to three different definitions (micro-, macro- and megatexture) which cover longitudinal wavelengths 0.001-0.5 mm, 0.5-50 mm, and 50-500 mm. In Finland texture data (macro and mega) of road pavements has been collected with high speed measurements together with rutting and IRI-measurements. The total amount of measurements is about 30 000 km per year. All measured variables have been calculated as RMS-values.

Microtexture of a pavement is a useful feature because it improves the friction between tire and pavement. However it is not very significant in Finnish road pavements for two reasons; it is not possible to measure it with high speed monitors and the polishing of pavements is not recognised to be a problem with Finnish heavily rutting pavements.

Macrotexture of a pavement has manifold effects; it improves friction but increases rolling resistance. The short-wave macrotexture has an effect to decrease the rolling noise and is therefore a useful property but the long-wave macrotexture increases noise. It is recommended to split the macrotexture variable in to two parts according to a threshold wavelength value, 10 mm. Macrotexture of wavelengths 0.5-10 mm could be called fine macrotexture and macrotexture of wavelengths 10-50 mm could be called rough macrotexture. In many studies macrotexture has been measured either as RMS-value or MPD-value. RMS-value is not very sensitive to the vertical orientation or direction of the surface texture. Instead of RMS-value the MPD-value is sensitive to the vertical orientation and that is why the ratio of those variables can tell something valuable about the nature of texture. The orientation of surface with texture of $MPD > RMS$ is called positive and with $RMS > MPD$ called negative. New pavements in Finland usually have negative oriented texture. Negatively oriented pavements have several positive characteristics; they are nice to drive, low-noisy and they have a high friction level. Probably the rolling resistance on negatively oriented texture is lower than on positively oriented pavements. When the pavement gets older it loses the negative texture and it transfers to very strong positive texture and most of the good characteristics disappear. Therefore it would be useful to measure both variables RMS and MPD and focus on the orientation of texture as well.

Megatexture of a pavement is short-wave unevenness which is coming from wavelengths between macrotexture and roughness (IRI). Megatexture increases rolling resistance and tire and vehicle wear and is therefore an unwanted characteristic of a pavement. The initial value of megatexture depends on the quality of the treatment and remains quite stable during the aging of the pavement. Some irregularities as potholes, slab joints, bridge expansion joints and so on are also increasing megatexture. Values above 1.0 are high values.

Finnish pavements have been mostly made using the maximum aggregate size of 16 mm (77%). The most frequently used pavement types for high-volume roads are SMA 16 and AC 16. The pavement design for high-volume roads has been based strongly on the rutting problem, and less emphasis has been put to other features. In general the pavements are quite noisy and there has been made lots of research and development work to get less noisy pavements (especially in urban areas).

The texture data of pavements has been mostly unused. This study is trying to lift up the meaning and potential of texture data. It seems that the texture as a whole have several different effects and should be taken into use in the area of pavement design. The most acute need is to start measuring the correct texture variables. That means that the variables must be derived

from the physical mechanisms and effects of the phenomena. Macrotexture variable needs to be split into two parts and the texture orientation should be measured as well. More research is needed to find out how the texture is affecting to the three common outputs; rolling resistance, rolling noise and friction. More research is also needed to find out how pavement design and new variables relate to each other. After these goals it is possible to estimate the economic importance of the texture of pavements in more detail.

International co-operation is also needed to transfer results from other national and international results into Finnish circumstances.

Esipuhe

Tieverkon ylläpidon toiminnansuunnittelun tarpeisiin mitataan useita eri kuntotietoja, joista päällysteen pintakarkeus on yksi. Päällysteen kuntomuuttujista ovat eniten käytettyjä pinnan urautuneisuus, epätasaisuus sekä pintavauriot. Liikennevirasto laajentaa ylläpidon toimintalinjojen mukaisesti päällysteiden pinnan ominaisuuksien hallintaa selvittämällä pintakarkeuden merkitystä ja käyttöönottoa.

Tässä työssä on selvitetty päällysteiden pintakarkeuden mittausta ja vaikutuksia sekä laadittu suosituksia sen käyttöönnotolle.

Työtä ovat ohjanneet dipl.ins. Juho Meriläinen, fil. maist. Vesa Männistö ja dipl.ins. Sami Petäjä Liikennevirastosta ja sen ovat toteuttaneet dipl.ins. Pertti Virtala, dipl.ins. Arto Kuskelin ja tekn. tri Nina Raitanen Destia Oy:stä alikonsulttinaan Aalto yliopiston Auto- ja työkonetekniikasta tekn. lis. Panu Sainio ja Tietekniikan laboratorista dosentti Jarkko Valtonen.

Helsingissä helmikuussa 2010

Liikennevirasto
Tieosasto

Sisältö

1	TAVOITE	11
1.1	Tavoitteet.....	11
1.2	Rajaukset	11
1.3	Täsmennykset.....	12
2	LÄHTÖKOHTIA	13
2.1	Ylläpitoa ohjaavat toimintalinjat.....	13
2.2	Väyläomaisuuden hallinnan tutkimustuloksia	13
2.3	Asiakasanalyysit.....	14
3	TIEN PINTAKARKEUS ILMIÖNÄ	15
3.1	Karkeuden määritelmä	15
3.2	Karkeuden kehittyminen.....	18
4	KARKEUDEN MITTAAMINEN.....	26
4.1	Mittausperiaatteet	26
4.2	Makrokarkeus.....	28
4.3	Megakarkeus	30
4.4	Mittaustarkkuus.....	31
5	KARKEUDEN VAIKUTUKSET	34
5.1	Ajomukavuus.....	34
5.2	Polttoainetalous	36
5.3	Muut ajoneuvokustannukset	42
5.4	Turvallisuus.....	42
5.5	Ympäristö	44
5.6	Tienpito.....	48
5.7	Vaikutusten yhteenveto	49
6	KARKEUSTIEDON KÄYTTÖKOKEMUKSET	52
6.1	Suomi	52
6.2	Lähialueet.....	53
7	KARKEUDEN HALLINTA	56
7.1	Päällysteiden karkeustieto	56
7.2	Karkeuteen vaikuttaminen	57
7.3	Kuntoluokitus.....	60
7.4	Raja-arvot	62
8	KÄYTTÖÖNOTON OHJEISTUS.....	63
8.1	Tunnusluvut	63
8.2	Mittaaminen	63
8.3	Tietojen tallettaminen.....	64
9	JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSIA.....	66
10	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	70
	LÄHDEKIRJALLISUUS JA VIITTEET	73

HAASTATTELUT/KYSELYT	76
----------------------------	----

LIITTEET

Liite 1	Asiakasanalyysi
Liite 2	Karkeuskeskiarvoja 2009
Liite 3	Makrokarkeuden mittaaminen
Liite 4	Vierintävastusmittauksia 2004
Liite 5	Melun syntymekanismit
Liite 6	Mittausten analysointia
Liite 7	Makrokarkeuden muita kuntoluokitusvaihtoehtoja
Liite 8	Mittaustietojen talletusformaatti

1 Tavoite

1.1 Tavoitteet

Tämän työn tavoite on *”tutkia, miten päällysteen pinnan ominaisuustietoja, lähinnä erilaista karkeustietoa voidaan käyttää tienpidon suunnittelussa niin, että tien käyttäjien ja tien pitäjän kustannuksia voidaan hallita nykyistä tehokkaammin”*. Tutkimuksen kohteena on erityisesti selvittää tien pinnan ominaisuuksien vaikutusta ajokustannuksiin ja polttoaineen kulutukseen ja sitä kautta hiilidioksidipäästöihin.

Työn sisältö on ryhmitelty kappaleisiin, joissa selvitetään karkeuden määrittelyä, ilmiötä, vaikutuksia ja lopuksi analysoidaan miten karkeustiedon käyttö tulisi järjestää ja ohjeistaa. Aluksi käsitellään kappaleessa 2 karkeuden osuutta tien pinnan ominaisuuksien kuvaamisessa sekä sen osuutta tienpidon suunnittelussa ja ohjauksessa.

Kappaleessa 3 tarkastellaan päällysteiden pintakarkeuden syntymistä ja kehittymistä ilmiönä. Kirjallisuuden ja muiden käyttökokemusten avulla selvitetään lähivuosina tapahtunut tutkimus- ja kehitystyö pintakarkeuden ja sen vaikutusten osalta. Kotimaisten tutkimusten ja selvitysten lisäksi käydään läpi ulkomailla tehdyt soveltuvat tutkimukset sekä aihepiiriin liittyvät konferenssit.

Kappaleessa 5 käsitellään pintakarkeustiedon vaikutuksia tien käyttäjiin ja tienpiitoon. Kappaleessa 7 tehdään esitys miten pintakarkeustietoa kannattaa hallita ja kappaleessa 8 ohjeistetaan miten sitä tulisi mitata ja miten sitä tulee käyttää.

Jatkotutkimusesityksessä listataan alustavasti jatkotutkimusta edellyttävät asiat ja niiden tärkeys pintakarkeustiedon hyödyntämisen kannalta.

Tämän selvityksen kannalta on keskeistä saada selville onko päällysteen pintakarkeus niin merkittävä pinnan ominaisuustieto, jotta sitä kannattaa alkaa käyttää toiminnan-suunnittelussa. Pintakarkeustiedon merkitystä tulee arvioida sen vaikutusten kautta. Sitä ennen tulee kuitenkin pohtia sen merkitystä yleisemmin yhdessä pinnan muiden ominaisuuksien kanssa.

1.2 Rajaukset

Työn taustaksi kartoitetaan siihen liittyvää kirjallisuutta lähivuosilta ja käyttökokemuksia lähialueilta. Kirjallisuusselvitys rajoittuu kuluva vuodesta taaksepäin siihen mitä Lampisen ja Rantasen tekemissä dokumenteissa on tehty. Käyttökokemusten osalta rajoitutaan selvittämään vain lähialueilla (naapurimaista) saatavia kokemuksia.

Tien päällysteen pintakarkeus rajoittuu aallonpituusalueelle 0.001-500 mm. Käytännössä sitä edelleen rajoittavat ne rajat, jotka mittaustekniikka asettaa.

Työssä ei ole tehty kenttäkokeita.

Karkeuteen liittyviä ominaisuuksia on selvitetty suhteessa Suomessa käytettäviin asfalttipäällysteisiin. Betonipäällysteiden karkeusominaisuuksia ei ole huomioida.

1.3 Täsmennykset

Työssä selvitetään pintakarkeuden käyttökelpoisuutta ja tarpeellisuutta ylläpidon toiminnansuunnittelussa. Ollakseen riittävän käyttökelpoinen tunnusluku sen täytyy täyttää tiettyjä vaatimuksia ja ominaisuuksia. Tunnusluvun tai ominaisuuden käyttökelpoisuutta arvioitaessa voidaan tarkastella esim. seuraavia näkökulmia:

- Mitattavuus. Tunnusluvun tulee olla mitattavissa luotettavasti.
- Vaikutavuus. Tunnusluvun tulee kuvata jotain merkittävää vaikutusta joko tien käyttäjälle, tienpitäjälle tai yhteiskunnalle.
- Vaikutettavuus. Tunnusluvun tulee olla sellainen, että tienpitotoimilla on mahdollista vaikuttaa sitä parantavasti.
- Luokiteltavuus. Tunnusluvun tulee olla luokiteltavissa eli sen hyvät ja huonot tasot tulee pystyä tunnistamaan.
- Tunnusluvun rahamääräistä merkitystä eri näkökulmilta tulee pystyä ainakin jossain määrin arvioimaan.
- Tunnusluvun tulisi olla osa tien kuntotilan kuvausta siten, että se tuo siihen jotain lisäarvoa eikä mene päällekkäin jo olemassa olevien tunnuslukujen kuvauksen kanssa.
- Tunnusluvulle tulee pystyä määrittämään sellaisia raja-arvoja, joita voidaan käyttää ohjelmoinnissa ajoituksen ja toimenpiteen valinnan pohjana.
- Tunnusluku saisi olla osa tien toiminnallisia vaatimuksia.

2 Lähtökohtia

2.1 Ylläpitoa ohjaavat toimintalinjat

Päällysteiden pinnan ja rakenteiden ominaisuuksilla on merkittävä asema tieverkon ylläpidon toiminnansuunnittelussa. Ylläpito on perinteisesti pohjautunut pinnalta mitattaviin ura- ja epätasaisuustunnuslukuihin sekä pinnan vaurio- ja kantavuustietoihin. Laserpohjaisten mittausten menetelmien käyttöönotto vuonna 2003 mahdollisti myös pintakarkeustiedon mittaamisen. Karkeustietoa on kerätty Tiehallinnon/Liikenneviraston kuntotietorekisteriin jo seitsemän vuoden ajan.

Vilkaasti liikennöidyt tiet ovat Suomessa voimakkaan nastarengaskulutuksen alaisia. Päällystesuunnittelussa kiinnitetään erittäin paljon huomiota nastarengaskulutukseen ja kulumiskestävyyteen. Tästä syystä Suomessa vilkkaiden maanteiden päällysteet ovat pinnaltaan melko karkeita.

Päällysteiden ylläpidon toimintalinjojen laadinnan yhteydessä (2006) haluttiin laajentaa kuntoa kuvaavien muuttujien kattavuutta siten, että tien käyttäjien tarpeet ja odotukset tulisivat paremmin huomioitua. Toimintalinjoissa [1] todettiin mm. seuraavaa:

- Tiestön kunto nähdään ensisijaisesti **asiakkaiden palvelutasona** (s 17).
- Palvelutasoa määritettäessä otetaan huomioon mahdollisimman laajasti yhteiskunnalliset vaikutukset, esim. **liikenneturvallisuus, ympäristövaikutukset, tienpidon taloudellisuus** ja alueiden kehittäminen (s 17).
- Asiakstarpeiden analysoinnin perusteella aiemmin käytettyjen kolmen kriteerin (uraisuus, epätasaisuus ja vauriot) rinnalla tulee käyttää viittä muuta muuttujaa, jotka ovat harjanne, sivukaltevuus, **karkeus**, yksittäisepätasaisuudet sekä vaurionopeus (s 25).
- Pääteillä ja muilla vilkasliikenteisillä teillä tulee aiempien kriteerien lisäksi huomioida liikenneturvallisuuteen vaikuttavat sivukaltevuus ja yksittäisepätasaisuudet sekä **meluun, rengaskulumiseen ja polttoainetalouteen vaikuttavat karkeusmittarit** (s 25).

Toimintalinjojen selvä viesti on, että päällysteiden pintakarkeustiedon käyttöönottoa tulee edistää.

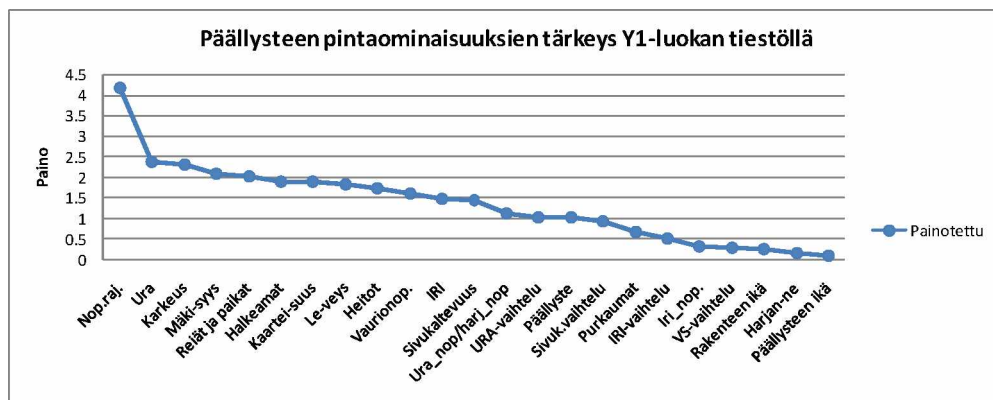
2.2 Väyläomaisuuden hallinnan tutkimustuloksia

Väyläomaisuuden hallinnan tutkimusohjelmassa tehtiin vuosina 2004–2005 kaksi selvitystä, joilla haettiin tietoa siitä, miten tien epätasaisuus vaikuttaa ajoneuvojen vierintävastukseen ja polttoaineen kulutukseen. Toisessa niistä, Anssi Lampisen tekemässä kirjallisuuskatsauksessa [3], oli viitteitä siitä, että makro- ja megakarkeus olisivat merkittäviä vierintävastukseen ja sitä kautta polttoaineen kulutukseen vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi Kati Rantanen on tehnyt vuonna 2005 diplomityönsä aiheesta ”Päällysteen karkeustiedon hyödyntämismahdollisuudet”. Siinä esitettiin karkeuteen liittyviä tutkimustuloksia ja suositeltiin sen käyttöönottoa.

Päällysteiden pintakarkeuden tutkimiselle ja hyödyntämiselle on näin ollen selvä tarve.

2.3 Asiakasanalyysit

Päällysteiden ominaisuuksien keskinäistä tärkeyttä voidaan arvioida erilaisilla tavoilla. Tässä työssä se on tehty ns. asiakasanalyysin avulla, missä ensin on ryhmitelty tienkäyttäjiä asiakasryhmiin; moottoripyöräilijä, henkilöautoilija ja raskaan ajoneuvon kuljettaja. Muiksi ”asiakastahoiksi” on valittu tienpitäjä, urakoitsija ja yhteiskunta. Asiakasryhmien odotuksia ja tarpeita on valittu edustamaan yhteensä 17 laatuattribuuttia. Tämän jälkeen on määritetty, mitkä tien teknisistä ominaisuuksista tai mittareista voisivat olla vaikuttamassa kuhunkin laatuattribuuttiin. Yleensä nämä ovat niitä tuotteisiin tai palveluihin (tässä tapauksessa tiehen) liittyviä teknisiä ominaisuuksia tai suunnitteluparametreja, joilla tuotetta tai palvelua suunnitellaan ja valmistetaan. Päällysteiden ylläpidossa päähuomio on niissä ominaisuuksissa, jotka liittyvät päällysteiden kuntoon ja sen vaikutuksiin. Sitten on arvioitu miten tärkeä kukin mittari kaiken kaikkiaan on ja laskettu mittareille painokertoimet painottamalla tärkeyttä kuvaavat luvut asiakasryhmien painokertoimilla. Tuloksena on saatu tiehen liittyvien teknisten mittareiden (ominaisuuksien) tärkeyttä kuvaava järjestyskäyrä kuvan 1 tapaan. Tärkeimmäksi tekijäksi saatiin nopeusrajoitus, mikä epäilemättä vilkasliikenteisellä tiellä on käyttäjien vahvasti arvostama ominaisuus. Se ei kuitenkaan kuulu pinnan kuntoa kuvaaviin ominaisuuksiin. Pinnan kuntoa kuvaavista ominaisuuksista suurimman painon sai ura ja sen jälkeen tuli pinnan karkeus.



Kuva 1. Tien pinnan ominaisuuksien tärkeys vilkasliikenteisen tien asiakasanalyysin perusteella. Tärkein kuntoa kuvaava ominaisuus on ura ja toiseksi tärkein kuntoa kuvaava ominaisuus on pinnan karkeus.

Kun eri asiakkuusryhmiä painotetaan yksittäin, tien käyttäjien näkökulmasta karkeuden tärkeys on hyvin tärkeä, mutta urakoitsijan tai tienpitäjän näkökulmista se ei ole yhtä tärkeä vaan kymmenentenä tai kahdeksantena.

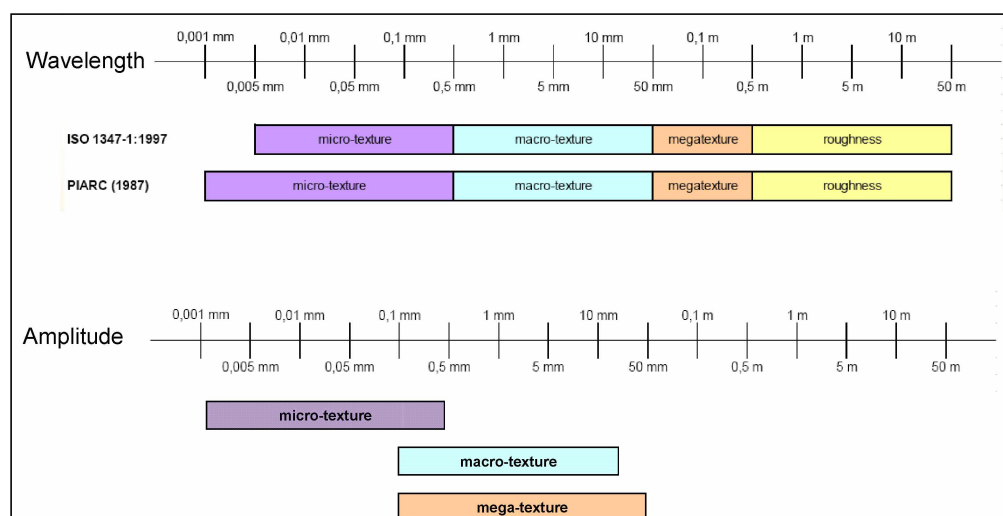
Vaikka kyseinen analyysi ei ole kovin tarkka, siitä saadaan kuitenkin vihjeitä sille, että pinnan karkeus on todennäköisesti merkittävä ominaisuus vilkasliikenteisellä tiestöllä. Vähäliikenteisemmälle tieverkolle sovellettuna karkeuden painoarvo vähenee ja muita tien pinnan ominaisuuksia tulee sitä tärkeämmäksi. Analyysi on esitetty tarkemmin liitteessä 1.

3 Tien pintakarkeus ilmiönä

3.1 Karkeuden määritelmä

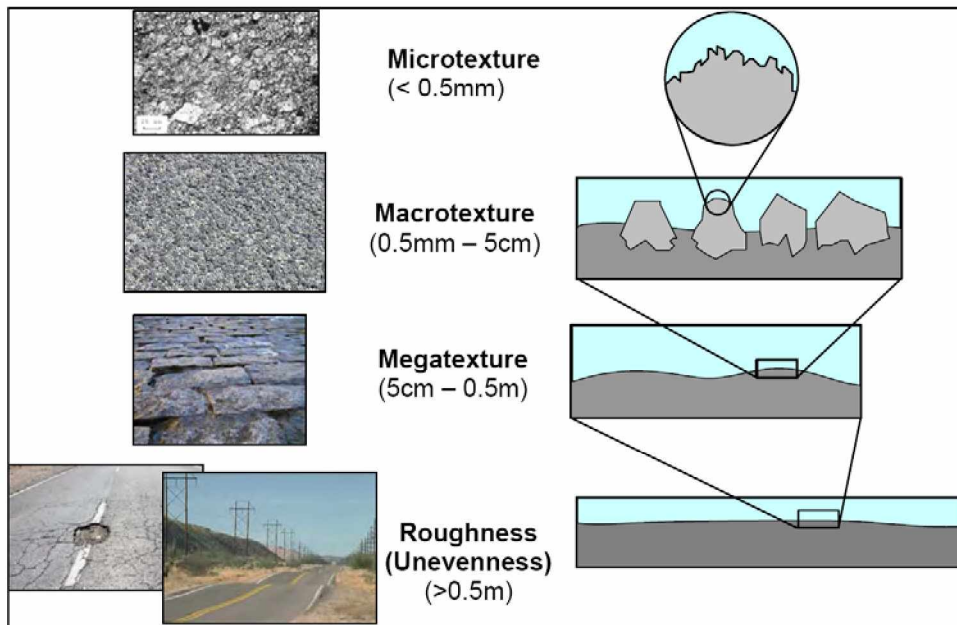
Asfalttipäällysteet koostuvat kolmesta eri materiaalista, jotka ovat kiviaines (>90%), bituminen sideaine sekä täyteaine, joka voi koostua kalkkikivestä, lentotuhkasta tai selluloosakuiduista. Lisäksi päällystemassa sisältää tietyn määrän tyhjätillaa. Kiviaines sisältää sekä varsinaisen kiviaineksen että hienoaineksen [20]. Näiden ainesosien keskinäisten suhteiden osuutta päällysteessä kutsutaan suhteutukseksi. Päällystettä valmistettaessa, levitettäessä ja jyrättäessä siihen syntyy sekä pituus- että poikkisuuntaista epähomogeenisuutta, joka muuttuu kun liikenne kuluttaa sitä. Päällysteessä olevaa epähomogeenisuutta on mahdollista tutkia mittaamalla sen kolmiulotteisuutta. Päällysteen pystysuuntaiset vaihtelut ilmenevät tietyllä aallonpituusalueella pinnan karkeutena. Pinnan karkeutta on pituussuuntaisen aallonpituusalueen 0.001-500 mm sisältämä pystysuuntainen epähomogeenisuus. Kirjallisuudessa päällysteen pinnan karkeus jaetaan yleensä kolmen eri aallonpituusalueen komponenttiin.

Tien päällysteen pinnan karkeutta ovat pinnan poikkeamat tasopinnasta karkeuden aallonpituusalueella (alle 0.5 m) jaettuna mikro-, makro- ja megakarkeuksiin [6]. Toisinaan aallonpituuden sijasta esitetään aaltoluku, joka on aallonpituuden käänteisluku. Mikro-, makro-, megakarkeuden ja epätasaisuuden välisiä aallonpituuksien raja-arvoja 0.5 mm – 50 mm – 500 mm – 50 m vastaavat aaltoluvut ovat 2000 – 20 – 2 – 0.02 (kpl/m). ISO-standardissa mikrokarakteen aallonpituusalue lähtee viidestä mikrometristä ja PIARCin määritelmässä yhdestä mikrometristä (Kuva 2). Joissakin tutkimuksissa karkeutta kuvataan desibelitasoilla, jolloin mitatusta karkeustunnusluvusta muodostetaan desibelimuuttuja vertaamalla sitä referenssitason, joka on yksi mikrometri. Karkeuksien amplitudialueet ovat vastaavasti 0.001-0.5 mm, 0.1-20 mm ja 0.1-50 mm.



Kuva 2. Päällysteen pituussuuntaisen epätasaisuuden jakautuminen eri komponentteihin aallonpituuden perusteella ISO:n ja PIARC:n määritelmissä sekä komponenttien amplitudialueet (aallonpituuskuva lähteestä [35] ja amplitudialueet lähteestä [37]).

Kuvassa 3 havainnollistetaan pituusprofiilista tuotettavien tunnuslukujen aallonpituusalueesta riippuvia mittakaavoja. Mikrokarkeus on päällysteessä olevien kiviainesrakeiden pinnan pienimuotoista epäsäännöllisyyttä. Makrokarkeus on päällysteen pinnan kivirakeiden ja ajoneuvon renkaan kumipalojen mittakaavassa olevaa epäsäännöllisyyttä. Megakarkeus on renkaan ja tien pinnan välisen kosketuspinnan mittakaavassa olevaa pinnan epäsäännöllisyyttä. Kaikki karkeutta kuvaavat tunnusluvut ovat tien ja renkaan välisen kosketuspinnan vuorovaikutusmekanismin osatekijöitä.



Kuva 3. Pituussuuntaisen epätasaisuuden eri tunnuslukujen mittakaavat. [41].

Megakarkeus

Megakarkeus on pinnan karkeusominaisuus, joka sijoittuu aallonpituusalueena makrokarkeuden ja epätasaisuuden väliin. Sen epätasaisuusalue on suunnilleen samaa luokkaa kuin ajoneuvon renkaan ja tien pinnan välinen kosketuspinta. Megakarkeuteen vaikuttavat yksittäiset päällysteen pinnan epäsäännöllisyydet kuten:

- reiät
- siltojen liikuntasaumot
- betonipäällysteiden laattojen saumat
- kiviainesrakeiden irtoamiskohdat
- päällysteiden vaihtumiskohdat tai jyrsinät
- ajoratamerkinnot
- muut edellisten kaltaiset vauriot tai epäjatkuvuuskohdat
- nimismiehen kihara -tyyppinen pinnan epätasaisuus

Megakarkeus on määritelty ISO-standardissa (ISO 13473-5). Normissa ei määritellä megakarkeuden arvoaluetta, mutta se on yleensä alueella 0.15-1.5 mm. Megakarkeus lasketaan tehollisena arvona (RMS) tai desibeliarvona. Desibeliarvo voidaan laskea joko koko aallonpituusalueelle tai yksittäisille oktaavialueille. Desibeliarvon vertailutasona on yksi mikrometri (RMS-arvona). Megakarkeus on päällysteen pinnalla ei-toivottu ominaisuus.

Makrokarkeus

Päällysteen makrokarkeus on pinnan raekokomittakaavan epätasaisuutta. Se määräytyy pääosin päällysteen kiviaineksen perusteella ja on yleensä uudella päällysteellä alussa suurta. Päällysteen ikääntyessä se vähenee silottumisen kautta alemmalle tasolle, mutta se saa syklistä, vuodenaikojen tahdissa tapahtuvaa vaihtelua nastarengaskauden ja kesärengaskauden vuorotellessa. Makrokarkeus aiheuttaa vierintävastuksen lisääntymistä renkaan hystereesihäviöiden kautta sekä tietyissä tilanteissa lisää vierintämelua. Makrokarkeus vaikuttaa myös veden poistumiseen päällysteen pinnalta. Sillä on vaikutusta renkaan ja tien pinnan väliseen märkäkitkaan erityisesti suurilla nopeuksilla.

Makrokarkeus voi olla hyödyllistä karkeutta tai haitallista karkeutta. Karkeuden hyödyllisyys ja haitallisuus riippuvat sen aallonpituudesta ja amplitudista. Makrokarkeudesta on hyötyä märällä tienpinnalla veden pois kulkeutumiseen renkaan ja tien välisestä kosketuskohdasta. Tietynlainen makrokarkeus vähentää melua.

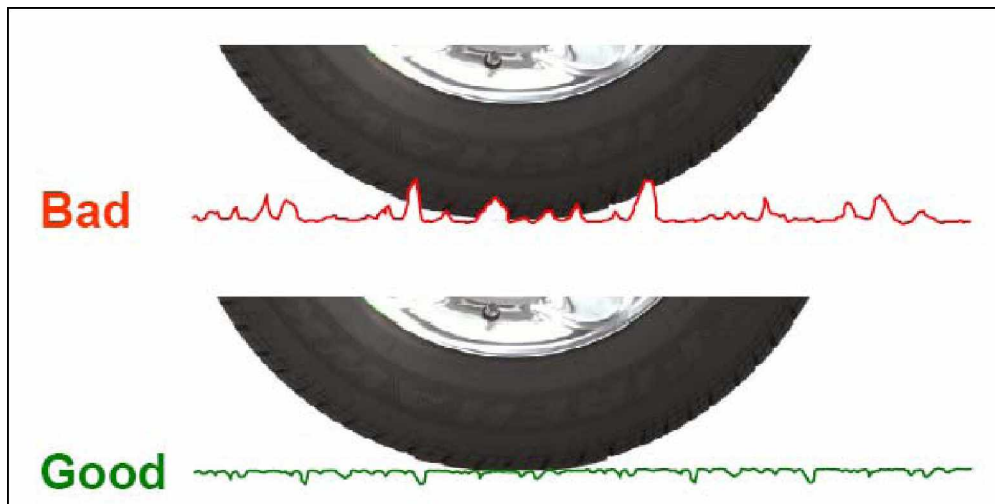
Mikrokarkeus

Mikrokarkeus on päällysteen kiviainesrakeiden pintatason karkeutta. Se kuvaa miten sileitä pinnan kiviainesrakeet ovat. Mikrokarkeus vähenee liikenteen kuluttaessa päällysteen pintaa. Se on merkittävä kitkaan vaikuttava tekijä alhaisilla nopeuksilla. Mikrokarkeutta on hyvä olla mahdollisimman paljon. Kitkan ohella se lisää myös ajoneuvon renkaiden kulumista. Mikrokarkeutta on sen pienimuotoisuuden takia vaikea mitata.

Karkeuden suunta

Päällysteen makrokarkeus voidaan erotella sen vertikaalisen suunnan perusteella positiiviseen ja negatiiviseen karkeuteen. Positiivisesti suuntautuneessa karkeudessa pinnan epäsäännöllisyydet ovat pinnasta ylöspäin ulottuvia ja vastaavasti negatiivisesti suuntautuneessa karkeudessa pinnasta alaspäin suuntautuneita. Karkeuden suunta ei ole yleensä puhdas jompikumpi vaan päällysteen pinnassa voi olla molempia, mutta niiden osuudet vaihtelevat.

Negatiivisesti suuntautunut karkeus toimii samaan tapaan kuin huokoisuus ja vähentää tien ja renkaan välistä melua (Kuva 4). Positiivisella karkeudella on haitallisia vaikutuksia. Karkeuden suunnan on todettu vaikuttavan eniten meluun, mutta vaikutukset kitkaan ja vierintävastukseen arvellaan olevan samansuuntaisia. Niiden suhteen tarvitaan enemmän tutkimusta.



Kuva 4. Pintakarkeus voidaan jakaa kahteen komponenttiin, positiiviseen ja negatiiviseen karkeuteen. Positiivinen karkeus suuntautuu pinnasta ylöspäin ja negatiivinen karkeus pinnasta alaspäin. Negatiivinen karkeus on melun kannalta hyvä asia ja positiivinen taas huono [4].

3.2 Karkeuden kehittyminen

Alkukarkeus ja lajittuminen

Alkukarkeudella tarkoitetaan uuden päällysteen karkeutta. Uuden päällysteen pintakarkeus riippuu monista tekijöistä, joista merkittävimpiä ovat päällysteen tyyppi ja siinä käytetyn kiviaineksen maksimiraekoko. Maanteiden päällysteistä eniten käytettyjä päällystetyyppejä ovat AB-, PAB-P-, PAB-V-, ja SMA-päällysteet. Vilkasliikenteisillä teillä käytetyimmät päällystetyypit ovat AB ja SMA. Suomessa tehtävissä päällysteissä on käytetty suurempiraekoisia kiviaineita (pääasiassa 16, 18, 20 ja jopa 32 mm) kuin Keski-Euroopassa. Yleisin maksimiraekoko on 16 mm, jota on 77 % (Taulukko 1).

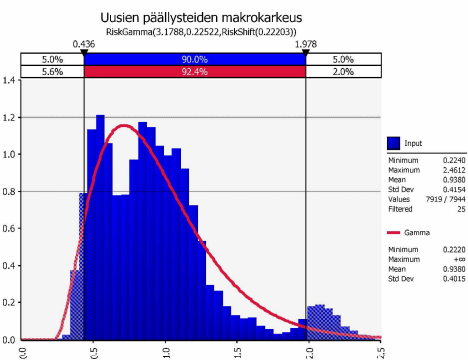
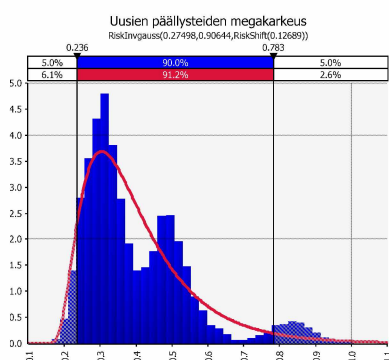
Kiviaineksen lisäksi päällysteen alkukarkeuteen vaikuttavat erilaiset työvirheet kuten kiviaineksen lajittumat tai sideaineen pintaan nousu. Sekä suhteutuksessa että työvaiheessa syntyy erilaisia virheitä, jotka aiheuttavat vaihtelua tasalaatuisuuteen. Kiviaineksen lajittumista tapahtuu lavalla kuljetuksen yhteydessä. Lajittuminen aiheuttaa purkautumisherkkyyttä mikä johtaa päällysteen purkaantumiseen ja pitemmällä aikavälillä reikiintymiseen. Bitumin pintaan nousussa on paikallisesti liikaa bitumia ja ne päällysteen kohdat saattavat olla liukkaita. Tällaisten kohtien kitka joudutaan mittaamaan erikseen ja niitä voidaan joutua karkeuttamaan. Nämä kohdat eivät tule esiin 100 m raportointiväleille laskettavissa karkeusmuuttujissa.

Taulukko 1. Päälystepituudet (km) päälystetyypin ja maksimiraekoon mukaan (Lähde: Kuntotietorekisterin yleistiedot 30.4.2009)[33].

Päälysteiden päälystetyypit ja maksimiraekoko (Kuntotietorekisterin yleistiedot 2009)

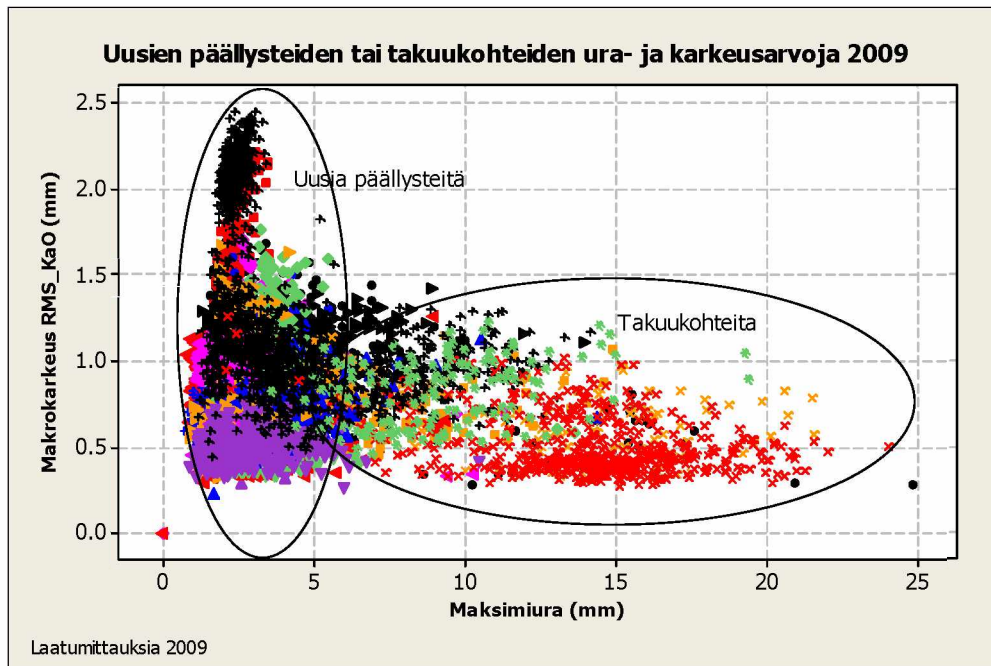
Maksimi- raekoko	Päälystetyyppi (Paall. tyyppi)											Yhteensä km	Yhteensä %
	AB	ABK	ABS	BET	EA	PAB-B	PAB-O	PAB-V	SIP	SMA	SOP		
5	0.5					2.8						3	0.0 %
6	1.6					84.1						86	0.2 %
8	58.4				0.1	0.4		0.2	0.2	89.8		149	0.3 %
10	3.0										1.2	4	0.0 %
11	151.5				3.6	50.2		135.6	8.9	220.1	52.5	622	1.2 %
12	880.8	0.2			1.2	176.2	2.1	206.7	21.8	58.7	632.6	1980	3.9 %
13	2.7							5.8				9	0.0 %
14	4.3					50.6		58.0		1.4	6.1	120	0.2 %
15	9.6							19.4			0.1	29	0.1 %
16	11541.2	44.5	3.5	5.7	250.1	7570.5	38.6	15645.8	19.5	3494.9	475.5	39090	77.2 %
17	0.0							1.4				1	0.0 %
18	1373.0	0.4			66.1	692.2		1539.6		650.2	12.9	4334	8.6 %
19	44.1									0.3		44	0.1 %
20	2435.4	39.1	12.2		116.9	454.2		311.3		132.6	0.0	3502	6.9 %
21	20.7							8.1				29	0.1 %
22	215.5				23.4			0.2		25.7		265	0.5 %
23	0.8											1	0.0 %
24	1.4	0.5										2	0.0 %
25	194.4	149.8				1.2		2.1				347	0.7 %
26	0.0							3.7				4	0.0 %
28	2.3											2	0.0 %
30	2.6	1.4								0.1		4	0.0 %
32	6.1	22.6				1.5				4.7		35	0.1 %
Yhteensä	16950	258	16	6	461	9084	41	17936	50	4680	1181	50663	100 %
	33 %	1 %	0 %	0 %	1 %	18 %	0 %	35 %	0 %	9 %	2 %		

Päälysteen karkeus päälystämisen jälkeen riippuu päälystetyypistä ja siinä käytetystä kiviaineksesta. Karkeus voi olla joko pientä tai suurta (Kuva 5). Megakarkeuden keskiarvo on 0.4 mm ja vaihtelualue 0.1-1.0 mm. Makrokarkeuden keskiarvo on 0.9 mm ja vaihtelualue 0.2-2.5 mm. Jakaumien monihuippuisuudesta voidaan päätellä, että aineistossa on hyvin erilaisia päälysteitä.



Kuva 5. Uusien päälysteiden alkukarkeuksien (megakarkeus ja makrokarkeus) jakaumia. Lähdeaineistona on vuonna 2009 tehtyjä laatumittauksia noin 800 km.

Kuvassa 6 on esitetty uusilta päälysteiltä tehtyjen laatumittauksen alkukarkeusarvoja sekä maksimiuran syvyyksiä. Laatumittauksiin sisältyy pääosin uusia päälysteitä, mutta jonkun verran myös takuukohteita. Takuukohteet ovat muutaman vuoden ikäisiä. Uratiedon avulla ne pystytään erottelemaan ainakin karkeasti toisistaan. Makrokarkeuksien arvot ovat vaihdelleet välillä 0.25-2.5 mm.



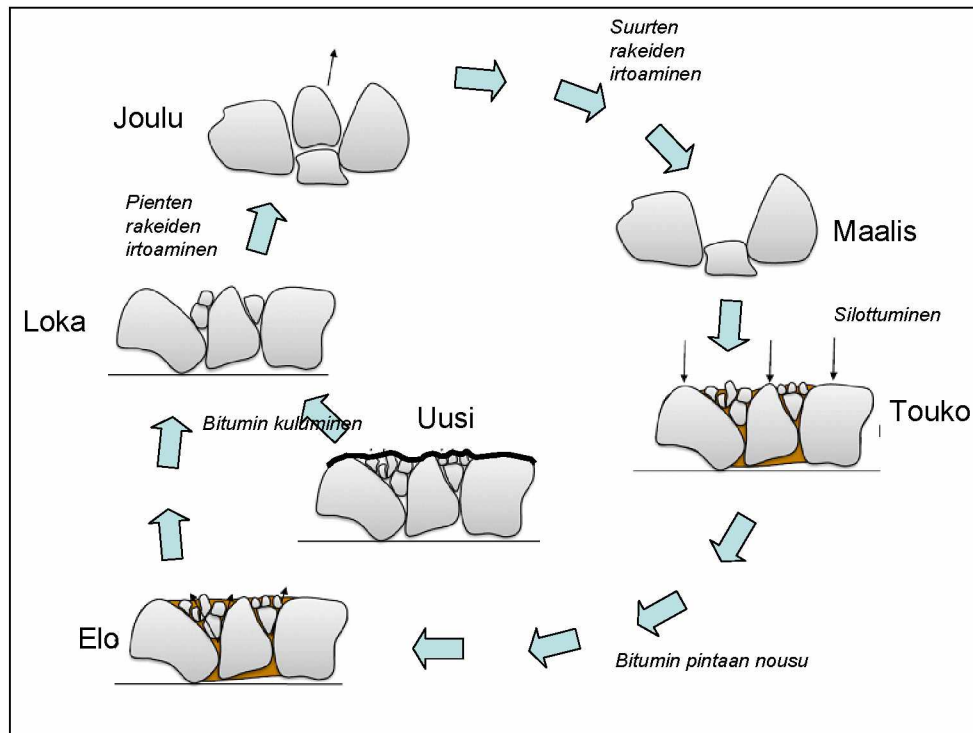
Kuva 6. Makrokarkeuden arvoja uusilta päällysteiltä tai takuukohteilta 2009. Uratiedon avulla voidaan erotella uudet kohteet takuukohteista.

Silottuminen

Silottuminen on liikenteen aikaansaamaa päällysteen karkeuden pienenemistä. Silottuminen mahdollistuu keväisin kun nastarengaskulutuksen jälkeinen karkea päällysteen pinta alkaa ilman lämpötilan noustessa ja liikenteen vaikutuksesta silottua (Kuva 7, maalís-touko).

Silottumista on tutkittu useissa eri tutkimuksissa Euroopassa. Silottumistutkimuksissa tarkastellaan yleensä uuden päällysteen kitkaa suhteessa päällysteelle kertyvien ylityskertojen määrään. Alussa kitka hiukan kasvaa kun uuden päällysteen pinnasta kuluu bitumia, mutta sitten se alkaa vähentyä ja saavuttaa lopulta tietyn vakiotason, jonka jälkeen kitka vaihtelee vain vähän eri vuodenaikoina [38]. Silottumisilmiöt ovat Keski-Euroopassa ja erityisesti lämpimissä maissa hyvin erilaiset kuin Suomessa. (Suurin osa aineistosta on eri skaalalla kuin Suomessa).

Sekä kevyt että raskas liikenne aiheuttavat päällysteen silottumista. Nastarenkaiden poistuminen käytöstä tapahtuu keväisin noin kuukauden pituisen aikajakson aikana. Päällysteiden silottuminen tapahtuu hyvin nopeasti ensimmäisten helteiden aikana (jopa 2 viikon aikana). Silottumiseen vaikuttaa eniten lämpötilan nousu eikä niinkään nastarengaskauden päättymisen. Silottumista on käsitelty yleensä melun käsittelyn yhteydessä.



Kuva 7. Päällysteen kulumista, karkeutumista ja silottumista yhden vuoden aikana.

Asfaltin silottuminen/kiillottuminen alentaa päällysteen ja renkaan välistä kitkaa ja sen myötä heikentää turvallisuutta. Suomessa asfalttien kiillottumista ei pidetä ongelmana, koska talvisin käytetään runsaasti nastarenkaita. Kitkarenkaiden käytön yleistyessä kiillottuminen voi muodostua tiettyjen kivilaatujen ongelmaksi myös Suomessa [26].

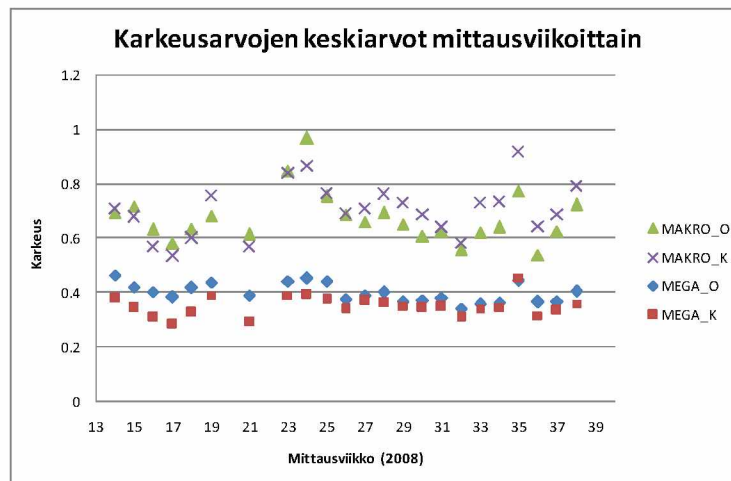
Ruotsissa on tehty tutkimuksia, joissa on havaittu, että keventyneiden nastarengasmääräysten seurauksena on syntynyt tilanteita, joissa päällysteiden märkäkitka on alentunut merkittävästi. Silottumista tapahtuu eniten kaarteissa, liikenneympyröissä, risteyksissä tai kohdissa, missä tapahtuu paljon jarrutuksia tai kiihdytyksiä. Nämä kohdat ovat sellaisia, joissa kitkaa erityisesti tarvittaisiin. Useissa maissa on käytössä kiviaineksen silottumiseen liittyviä määräyksiä, joissa asetetaan raja-arvoja kiviaineksen PSV-arvolle (Polishing Stone Value). Ruotsissa käytetään kivilaatuja, joilla tämä riski saattaa olla todellinen [39].

Eräs likimääräinen tapa on arvioida silottumista vertaamalla urista mitattujen karkeuksien suhdetta urien välistä (keskeltä) mitattuihin karkeuksiin eri ajankohtina. Taustalla on oletus, että karkeus kehittyy pääasiassa ajourissa, mutta pysyy ennallaan tai muuttuu vain vähän niiden välissä. PTM-kevätmittaukset suoritetaan viikoilla 13-18 ja PTM-kesämittaukset viikoilla 23-35. Kevätmittausten alussa saaduista tuloksista päästään tarkastelemaan karkeuksia silloin kun ne ovat suhteellisen korkeita. Vertaamalla niitä kesällä saatuihin tuloksiin voidaan arvioida karkeusmuutosten suuruutta.

Vilkasliikenteisillä pääteillä ($KVL > 6000$ ajon/vrk) uran pohjan makrokarkeuden suhde keskeltä mitattuun makrokarkeuteen on keväällä keskimäärin 1.05 ja pienenee kesällä ollen 0.94 (Taulukko 2). Vastaavasti megakarkeudelle suhteet ovat keväällä 1.27 ja kesällä 1.09. Suhdeluku vaihtelee yksittäisten satametrinen kohdalla paljon (0.5-3). Viikkokeskiarvoja on esitetty kuvassa 8.

Taulukko 2. Ajourista ja niiden välistä mitattujen karkeuksien suhde vilkasliikenteillä pääteillä. Aineistossa kevätmittauksia 2655 km, kesämittauksia 2039 km. Kevään ja kesän kohteet eivät ole samoja kohteita.

	Makrokarkeus		Megakarkeus	
	Keväällä	Kesällä	Keväällä	Kesällä
P5%	0.75	0.62	0.94	0.80
Keskiarvo	1.05	0.94	1.27	1.09
P95%	1.44	1.29	1.78	1.50

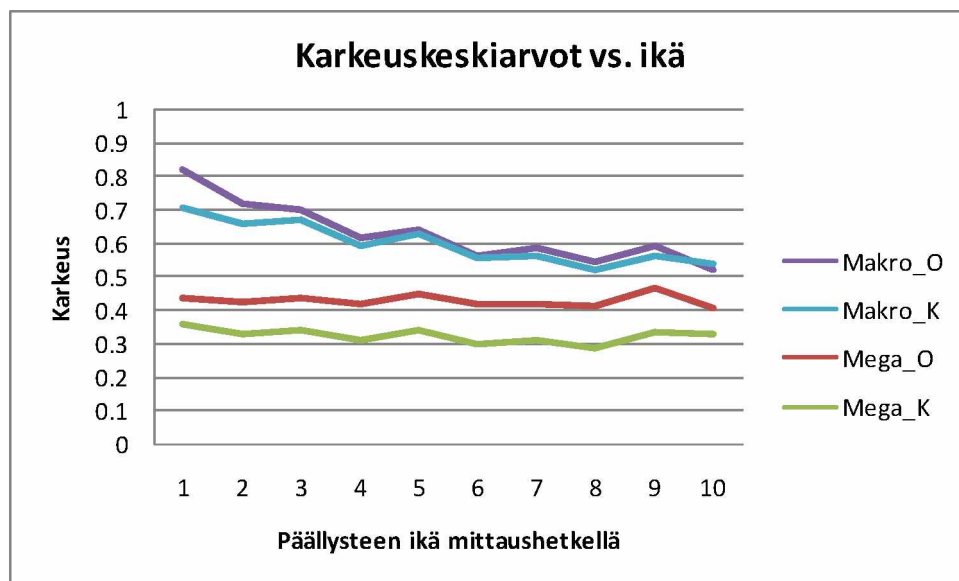


Kuva 8. Pääteiden karkeuksien keskiarvoja mittausviikoittain 2008. Kohteet vaihtuvat viikoittain eivätkä ole siten täysin vertailukelpoisia. Karkeuskeskiarvo pienenee keväällä ja myöhemmin mittauksiin tulee niin erilaisia teitä, ettei niistä voida tehdä karkeuden muuttumiseen liittyviä päätelmiä.

Kesällä mitatuissa karkeuksissa ajouran makrokarkeus on silottunut ajourien välin makrokarkeutta pienemmäksi. Megakarkeuden arvot urassa ja urien välissä ovat lähentyneet toisiaan. (Tässä on kuitenkin huomioitava, että kullakin viikolla on mitattu eri teitä eli mittauskohteet ovat saattaneet myös vaikuttaa kehitykseen).

Pitkäaikaisvaihtelu

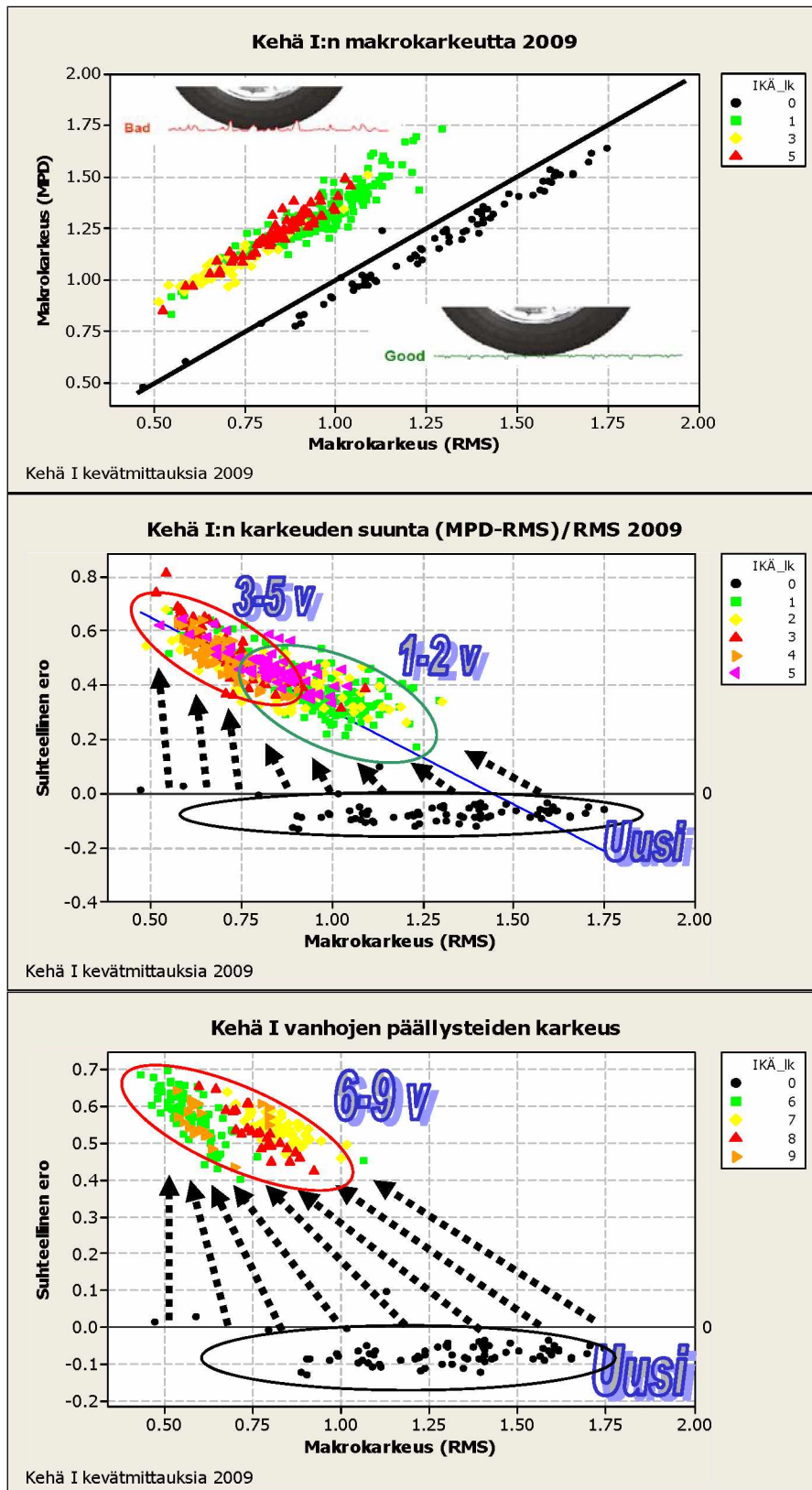
Kuvassa 9 on esitetty keväällä 2009 tehtyjen karkeusmittausten keskiarvoja eri-ikäisillä päällysteillä. Megakarkeuksien keskiarvot ovat välillä 0.3-0.5 eikä päällysteen ikä näytä vaikuttavan niihin. Makrokarkeuksien keskiarvot ovat nuorilla päällysteillä suurempia kuin vanhoilla päällysteillä. Täysin uudet päällysteet puuttuvat kuvan tarkastelusta.



Kuva 9. Keskimääräisiä (RMS) karkeusarvoja (100 m) keväällä 2009 eri-ikäisillä päällysteillä. Aineisto 7500 km). Makro_O=oikean ajouran makrokarkeus, Makro_K = ajourien välisen alueen makrokarkeus.

Vilkasliikenteisten teiden päällysteillä näyttää toteutuvan kuvassa 10 esitetty ilmiö, missä uuden päällysteen makrokarkeuden RMS- ja MPD-arvot ovat aluksi suuria. Uudelle päällysteelle on myös ominaista, että RMS-arvo on aina MPD-arvoa suurempaa eli erotus on negatiivinen. Kummankin tunnusluvun arvoalue vaihtelee uudella päällysteellä huomattavasti, mutta suhteellinen karkeusero on noin -10 %. Päällysteen vanhetessa karkeuden RMS-arvo alkaa voimakkaasti pienentyä ja MPD:n ja RMS:n suhteellinen ero muuttuu negatiivisesta positiiviseksi. 1-2 vuoden ikäisenä suhteellinen ero on noin +40% ja 3-5 vuoden ikäisenä jo +50 %. Suhteellinen ero jää lopulta välille 50-70 %.

Kuvan esimerkissä oli eri vuosina päällystettyjä tiejaksoja Kehä I:llä. Eri-ikäiset tienkohdat eivät ole fyysisesti samoja kohtia. Ilmiötä tulisikin tutkia samoilla tieosilla siten, että seurattaisiin samojen pisteiden (100 m jaksojen) kehitystä uudesta muutama vuoden ikäisiksi. Tällöin saataisiin tarkempi kuva miten erityyppisten päällysteiden karkeudet kehittyvät. Tarkastelu kuitenkin paljastaa, että karkeutta ei voida hallita pelkän RMS-tunnusluvun avulla.



Kuva 10.

Makrokarkeuden MPD-RMS arvojen kehittyminen Kehä I:llä. Yläkuvassa 0-5 vuoden ikäisten päällysteiden makrokarkeus MPD- ja RMS-arvoina. Keskikuvassa sama asia, mutta Y-akselilla suhteellinen ero. Alakuvassa sama kuin keskellä, mutta päällysteen ikä välillä 6-9 v. Karkeuskehitys on katkoviivanuolten suuntainen.

Purkautuminen ja reikiintyminen

Päällysteen purkautuessa siitä irtoa kiviainesrakeita. Irtoavan kiviaineksen määrän kasvaessa pinnan karkeus alkaa kasvaa. Kun purkautumista on tapahtunut tarpeeksi paljon, niin pahimmin purkautuneista kohdista alkaa muodostua reikiä. Purkaumia mitataan päällysteiden automaattisen vauriomittauksen yhteydessä, mutta siitä saatavia tuloksia ei ole toistaiseksi verrattu karkeusmittausten tuloksiin.

Englannissa purkautumista on arvioitu karkeusmittausten avulla. Purkautuneiden kohtien yksittäisiä puuttuvia kivirakeita on mahdollista tunnistaa siihen tarkoitukseen sovellettua karkeusmittausta käyttäen. Tämä mittausperiaate on esitetty tarkemmin kappaleessa 6.

Purkaumien muuttumista rei'iksi ei pystytä toistaiseksi vielä analysoimaan, koska päällysteiden reikiä ei tällä hetkellä mitata. Reikien paikkauksissa on todettu, että ne aukeavat joskus uudestaan, ellei niitä tiivistetä kunnolla.

Päällysteiden reiät osuvat dimensioidensa perusteella megakarkeuden aallonpituusalueelle.

4 Karkeuden mittaaminen

Päällysteen karkeuden mittaamiseen on olemassa useita eri menetelmiä. Osa menetelmistä on hitaita staattisia mittaamenetelmiä ja osa nopeita dynaamisia menetelmiä. Hitaat menetelmät ovat tarkempia kuin nopeat ja niitä käytetään testeissä. Nopeat mittaamenetelmät ovat yleistyneet mittauksissa. Mittaamisen nopeus määrää käytännössä pitkälle sen miten hyvin mitattava asia on hyödynnettävissä tienpidossa. Sen takia hitaita mittaamenetelmiä ei tässä yhteydessä varsinaisesti esitellä.

4.1 Mittausperiaatteet

Profilometri

Profilometri on tien pituus- tai poikkisuuntaan laitettava palkki, jonka varassa mitta-asanturia liikutetaan hitaasti toisesta päästä toiseen päähän. Profilometri –nimitys tulee siitä, että tiepäällysteestä mitataan 2-ulotteista profiilia (pituus- tai poikkisuunnassa). Mittaustiedot rekisteröidään tietokoneeseen ja tuloksista lasketaan karkeusarvot. Koska mittaus on hidas, päästään menetelmällä hyvinkin pienen aallonpituuden alueelle. Menetelmää käytetään yleensä makrokarkeuden mittaamiseen ja sillä voidaan korvata lasihelmimenetelmällä tehtävä mittaus. Mutta laseranturista riippuen sillä voidaan päästä myös mikrokarkeuden alueelle (Kuva 11).

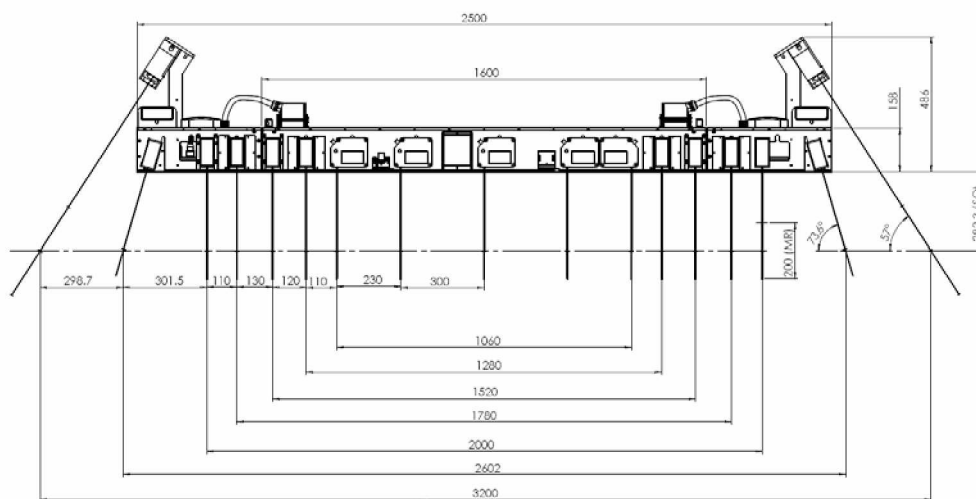


Kuva 11. Mikro- ja makrokarkeuden mittauslaite, profilometri.

Pistelasermittaus

Pistelasermittaus on myös profilometrimittausta, mutta se tehdään suurella mittausnopeudella (liikenteen nopeudella). Päällysteen pinnan karkeutta mitataan Tiehallinnon mittauksissa samanaikaisesti uraisuuden ja epätasaisuuden mittauksen kanssa. Pintakarkeuden tuottamiseen tarvittava informaatio saadaan pituussuuntaisten profiilien mittaamisella. Pituusprofiilia mitataan yhteensä 17 laseranturilla, jotka kattavat tien poikkisuunnassa 3,2 m levyisen mittausalueen. Antureiden keskinäiset etäisyydet toisistaan poikkisuunnassa vaihtelevat välillä 110–300 mm ja niitä on tiheimmin ajourien kohdalla. Pintakarkeutta mitataan vain kolmella anturilla, jotka sijaitsevat ajourissa ja ajourien keskellä. Epätasaisuuden ja megakarkeuden mittaamiseen tarvittavat pituusprofiilit voidaan mitata 16 kHz:n antureilla, mutta makrokarkeuden tuot-

tamiseen tarvittavat profiilit on mitattava 64 kHz:n antureilla, joten kummankin, makro- ja megakarkeuden, mittaus tapahtuu niillä (Kuva 12).



Kuva 12. Palvelutason mittausauton mittauspalkki ja mittausantureiden sijainti.

Tunnusluvut tuotetaan ensin yhden metrin raportointiväleillä ja sen jälkeen halutulla pitemmillä raportointiväleillä. Tiehallinnon rekisterimittauksissa raportointivälit ovat 10 m ja 100 m. Rekisterimittauksissa tuotetaan karkeustunnuslukuja vain oikeasta ajourasta ja kaistan keskeltä ajourien välistä (Myös vasemman ajouran pintakarkeus mitataan) (Taulukko 3).

Taulukko 3. PTM-mittausten mitattavat ja rekistereihin talletettavat tunnusluvut mitausurakassa 2008-2013. Yhteensä yhdeksää pintakarkeustietoa mitataan, joista neljä talletetaan Liikenneviraston tietovarastoihin (kuntorekisteriin tai vastaavaan).

Tunnusluku		Vasen ura	Ajourien väli	Oikea ajoura
Mikrokarkeus		Ei pystytty mittaamaan		
Makrokarkeus	MPD	Mitataan	Mitataan	Mitataan
	RMS	Mitataan	Talletetaan	Talletetaan
Megakarkeus		Mitataan	Talletetaan	Talletetaan

Markkinoilla on useita laitevalmistajia (Greenwood Eng., Dynatest, Ramboll-RST), joiden valmistamilla laitteilla makro- ja megakarkeus ovat mitattavissa melko yhteneväisin periaattein. Laitteiden soveltuvuus makrokarkeuden aallonpituusalueelta tuotettavien tunnuslukujen laskemiseen riippuu käytettävien mittausantureiden taajuudesta ja sen kautta mittausnopeudesta. Jos mittauksessa käytetään liian matalaa näytteenottotaajuutta, niin mittauksista tulee nopeusriippuvuutta, mikä heikentää toistettavuutta ja yhdenvertaisuutta.

Pistelasermittauksessa mittaushavaintojen keruuväli on 80 km/h mittausnopeudella matalataajuusanturilla noin 1.4-2.8 mm ja korkeataajuusanturilla noin 0.6-0.7 mm. Matalataajuisilla antureilla ei kyetä mittaamaan makrokarkeuden pienimpiä aallonpituusalueita (Taulukko 4). Suurtaajuusantureilla (64- kHz) käytännön mittausnopeuksilla päästään resoluutioon 0.4-0.8 mm.

Taulukko 4. Mittausnopeuden ja anturin taajuuden vaikutus karkeuden mittauksen resoluutioon (=pienin havaittava aallonpituus mm).

	Mittausnopeus km/h (m/s)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Anturin taajuus (kHz)	2.8	5.6	8.3	11.1	13.9	16.7	19.4	22.2	25.0	27.8
16	0.3	0.7	1.0	1.4	1.7	2.1	2.4	2.8	3.1	3.5
32	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.7
64	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
78	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7
Makrokarkeuden aallonpituuden alarajan kannalta vaadittava mittausalue vihreällä pohjalla										

4.2 Makrokarkeus

Makrokarkeudesta voidaan tuottaa useita eri tunnuslukuja, joista yleisimmät ovat profiilin keskisyvyys MPD ja profiilin tehollinen syvyys RMS. Profiilin keskisyvyydestä tuotetaan yleensä estimoitu profiilin syvyys kaavalla $ETD=0.2+0.8*MPD$. Muunnoskaavaa käytetään yleensä silloin kun muunnetaan profilometrisillä mittausmenetelmällä tuotettu tunnusluku volymetrisillä mittausmenetelmillä (Sand patch ja lasihelmimenetelmä) tuotettua arvoa vastaavaksi. Profilometrisellä mittauksella mitataan pinnan profiilia viivaa pitkin kaksiulotteisesti kun taas volymetrisellä mittauksella mitataan pintaa kolmiulotteisesti.

Profiilin keskisyvyys (MPD)

Profiilin keskisyvyys (MPD=Mean Profile Depth) on makrokarkeuteen liittyvä tunnusluku ja se mitataan yleensä jatkuvana molemmista ajourista ja ajourien keskeltä. Tämä tunnusluku on ISO-standardin 13473-1 mukainen. Makrokarkeuden mittauksessa tuotetaan 100 mm jaksoille pituussuuntainen profiili. Mitatulle profilille tehdään tiettyjä aallonpituus- yms. suodatuksia, jotka on esitetty tarkemmin liitteessä 2. Tämä tunnusluku tuottaa yhdessä RMS-tunnusluvun kanssa tietoa positiivisesta, pinnasta ylöspäin suuntautuvasta, ja negatiivisesta pinnasta alaspäin suuntautuvasta pinnan karkeudesta.

Profiilin tehollinen syvyys (RMS)

Profiilin tehollinen syvyys, RMS-karkeus, kuvaa tien pinnan pystysuuntaista poikkeamaa todellisesta tien pinnasta määritetyillä aallonpituuksilla. RMS-arvo on profiilin vaihtelun geometrinen keskiarvo. Siitä käytetään myös nimitystä tehollinen arvo, mitä käytetään vastaavalle termille sähkötekniikassa kun lasketaan tehollista jännitettä. Tunnusluvun laskentaperiaate on esitetty tarkemmin liitteessä 2.

Saaduista RMS-arvoista lasketaan keskiarvot halutulle raportointivälille. Suomessa mitataan ja tuotetaan keskiarvot 10 m ja 100 m raportointiväleille sekä molemmista ajourista että niiden keskeltä, mutta Kuntotietorekisteriin viedään vain oikeasta ajurasta ja ajourien välistä tuotetut arvot. Koska tämä tunnusluku on karkeuden suunnan suhteen tunnoton, sitä voidaan käyttää suuntaa kuvaavan ominaisuuden laskemisessa vertailuperustana.

Keskimääräinen karkeus (MTD)

Keskimääräinen karkeus on tunnusluku, joka saadaan volymetrisillä (lasihelmimenetelmä, Sand Patch-menetelmä) mittausten menetelmillä. Kun profilometrisillä menetelmillä tuotettu tunnusluku, MPD, muunnetaan muunnoskaavalla vastaamaan volymetrisen mittaustavan tunnuslukua, MTD, siitä käytetään tunnuslukua ETD (estimoitu profiilin syvyys). Tämä tunnusluku on kolmiulotteisen määrittymisen ansiosta aidoin karkeustunnusluku ja sitä käytetään usein tutkimuksissa. Sen huonona puolena on mittauksen hitaus.

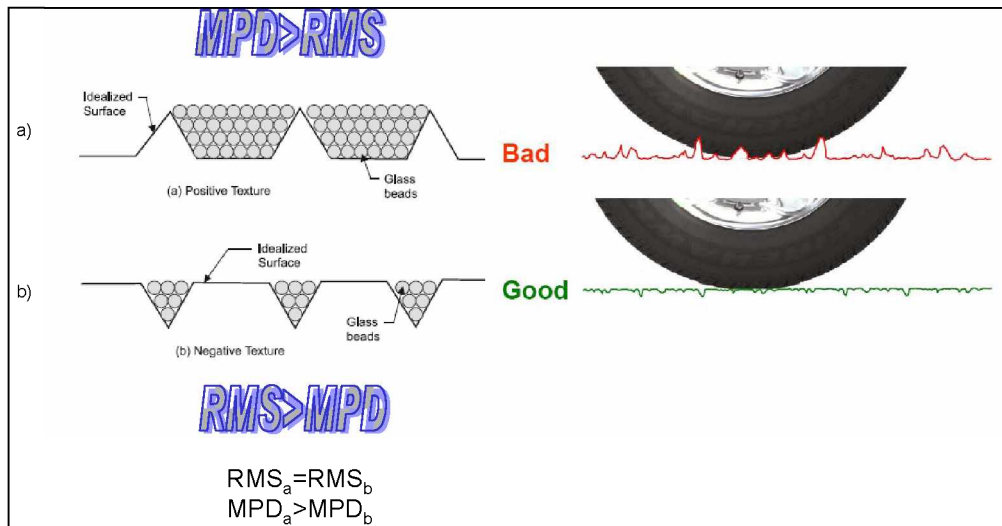
Makrokarkeuden suunta

Makrokarkeustunnuslukujen rinnalle on kirjallisuudessa tulossa käsite suunta, jolla huomioidaan miten pinnan karkeus on suuntautunut pinnasta ylöspäin (positiivinen suunta) tai alaspäin (negatiivinen suunta). Terminä suunta/suuntautuneisuus ei ole vielä kovin yleisesti käytössä vaikka karkeuksista puhuttaessa usein mainitaan päällysteen karkeuden negatiivisuus tai positiivisuus. Suunta vaikuttaa erityisesti pinnan meluun, kitkaan ja vierintävastukseen. Ylöspäin suuntautuneella karkeudella on haitallisia vaikutuksia kun taas alaspäin suuntautuvalla karkeudella on hyödyllisiä vaikutuksia.

MPD:n ja RMS:n avulla pystytään tunnistamaan profiilista karkeuden suunta (Kuva 13) [45]. Jos MPD on yli 5 % RMS-arvoa suurempi, karkeus luokitellaan positiivisesti suuntautuneeksi ja vastaavasti, jos se on yli 5 % pienempi, niin se luokitellaan negatiivisesti suuntautuneeksi. Niiden välissä suuntaa ei voida luokitella kumpaankaan edellisistä ja se on siten neutraali [42]. Todennäköisesti ± 5 %:n raja-arvot eivät sovi suomalaisille päällysteille, vaan ne tulisi määrittää mittausten ja kokemusten perusteella uudestaan.

Karkeuden suunnan huomioiminen tuo MPD- ja RMS-tunnuslukujen mittaamiselle uuden käyttötarkoituksen. RMS-tunnusluku on pinnan karkeuden suunnan suhteen neutraali kun taas MPD on sille herkkä, kuten kuvasta voidaan havaita. Profiilin a MPD on merkittävästi suurempi kuin profiilin b, mutta niiden RMS-arvot ovat samansuuruiset, koska profiili b on profiilin a peilikuva. Pelkkä MPD tai RMS eivät kerro karkeudesta kaikkea. Niiden suhteellinen erotus osoittaa karkeuden suuntautuneisuutta.

Termi - karkeuden suunta – ei ole kovin vakiintunut eikä sen laskentaperiaatetta ole standardisoitu, vaikka positiivisen ja negatiivisen karkeuden käsitteet on usein mainittu päällysteiden suunnittelun yhteydessä.



Kuva 13. Profiilit a ja b ovat toistensa peilikuvia. Molempien profiilien RMS-arvot ovat yhtä suuret, mutta profiilin a MPD on suurempi kuin profiilin b. MPD:n ja RMS:n suhteellinen erotus kuvaa karkeuden suuntaa. Pienillä eroilla profiilin karkeus on suunnaltaan neutraali, mutta suurilla suuntautunut. Etumerkki osoittaa kumpaan suuntaan suuntautuneisuutta on [42].

Power Spectral Density

PSD on menetelmä eri aallonpituusalueiden ja eri amplitudeilla vaikuttavan värähtelyn (tai epätasaisuuden) tarkasteluun sopiva melko teoreettinen menetelmä, jolla pystytään arvioimaan erilaisten pintojen vaikutusta. Sen etuna on, että sen avulla pystytään huomioimaan sekä aallonpituus että amplitudi, mikä yksinkertaisemmilla tavoilla jää huomiotta. Pystysuuntaisen epätasaisuuden aiheuttama heilahdus ajoneuvoon riippuu sekä epätasaisuuden aallonpituudesta että sen amplitudista. PSD:llä tien pinnan epätasaisuutta voitaisiin hallita kokonaisuutena jakamalla sitä eri osiin niin kuin nykyään tehdään.

PSD:n ja muiden yhtä teoreettisten menetelmien tutkiminen on alkanut yleistyä myös tiepäällysteiden pinnan vaikutusten mm. vierintävastuksen tutkimisessa. Tämä tunnusluku on esitetty ISO-standardissa.

4.3 Megakarkeus

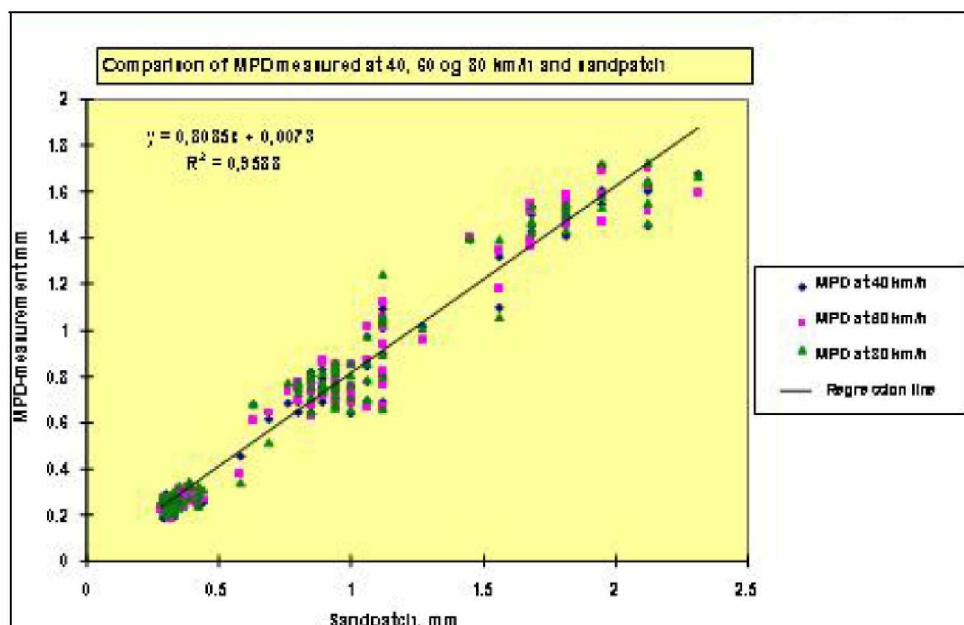
Megakarkeus mitataan päällysteiden palvelutasomittarilla ajourista ja niiden välistä. Mittaus tapahtuu kolmea eri mittalinjaa pitkin (2-ulotteisesti). Megakarkeus lasketaan RMS-tunnuslukuna. Yleisimmin käytetään megakarkeuden RMS-tunnuslukua, jonka yksikkönä on millimetri. Sen lisäksi voidaan käyttää desibelitasoiksi muunnettuja arvoja. Muunnos desibelitasoksi tehdään vertaamalla mitattua tulosta tiettyyn referenssitasoon ja ilmaisemalla vertailu desibeleinä.

4.4 Mittaustarkkuus

Kohdistuvuus

Kohdistuvuudella tarkoitetaan mitatun arvon suhdetta tosimitaan. Tiestömittauksissa on usein niin, että mitattaville tunnusluville ei ole olemassa varsinaista tosimittaa. Tien pinnan karkeuksillekaan ei ole olemassa tosimittaa. Makrokarkeudelle tosimitana on joskus pidetty volymetrisellä mittauksella saatua Sandpatch-arvoa. Kuvassa 14 on esitetty makrokarkeuden MPD-arvon suhde tähän arvoon. MPD-arvot ovat tyypillisesti hiukan pienempiä kuin Sandpatch-arvot, mutta yhteys niiden välillä on melko hyvä. Tasoero saadaan korjattua helposti tasokorjauksella, kuten kuvassa esitetyssä kaavassa on tehty.

Kirjallisuudessa ei ole saatavana viitteitä mikro- ja megakarkeuden suhteista tosimitaan. ISO-standardissa suositellaan makrokarkeuden mittaamiseen kalibrointikäytäntöä, missä käytetään säännönmukaisia kolmio- ja suorakaideprofiileja, joihin nähden mittauslaitteita voidaan kalibroida [16]. Eräissä selvityksessä on ehdotettu, että makrokarkeuden CTM-mittausmenetelmästä (Circular Texture Measurement) tehtäisiin makrokarkeuden tosimitta eli "Ground Truth" ja sitä ollaan viemässä mm. ASTM-standardiin.



Kuva 14. Makrokarkeuden MPD-arvon ja Sandpatch-arvon välinen yhteys (mainittu lähteessä 19, mutta alkuperäinen viittaus Vejteknisk Institutin tutkimukseen 1996).

Toistettavuus ja uusittavuus

Mittausepävarmuuden suhteesta mitattavan suureen kokonaisvaihteluun käytetään usein käsitettä gageRR%, joka on yleensä mittausjärjestelmien toimivuusanalyysien perustunnusluku. Se lasketaan jakamalla mittausepävarmuus kokonaisvaihtelulla. Sen hyvyys on luokiteltu kolmeen (tai neljään) luokkaan raja-arvojen 10%, (20%) ja 30% perusteella.

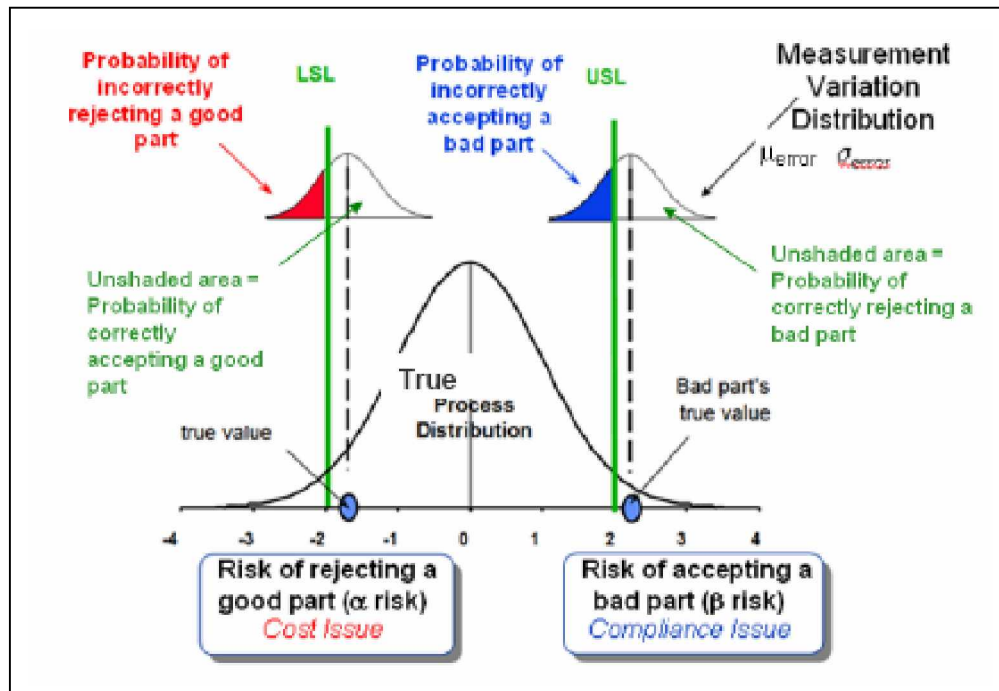
Tiehallinnon tilaamissa mittauksissa makro- ja megakarkeuksien mittaustarkkuudet analysoidaan ja varmistetaan joka vuosi ennen tuotantomittausten aloittamista suoritettavalla mittausjärjestelmän toimivuusanalyysillä. Mittausjärjestelmän toimivuusanalyysi käsittää kaikkien mittaussyksiköiden (mittausautot ja miehistöt) mittaustarkkuuden analysoinnin. Mittausten toimivuuteen luetaan kuuluvaksi sekä toistettavuus että uusittavuus. Niitä suhteutetaan mittaustulosten kokonaisvaihteluun ja hyväksymiskriteerinä on, että mittausepävarmuuden suhde kokonaisvaihteluun tulee olla alle 30 %, mutta mielellään alle 20 %.

Megakarkeuden toistettavuusvirheen hajonta on 0.026 mm. Kun sitä suhteutetaan mitattavaan kokonaisvaihteluun 0.122 mm, niin suhteellinen mittausepävarmuus on noin 21 %. Vastaavasti makrokarkeuden mittausrvirheen hajonta on 0.04 mm, ja kun sitä suhteutetaan mitattavaan kokonaisvaihteluun 0.21 mm, niin suhteellinen mittausepävarmuus on 19 %. Molempien tunnuslukujen mittaustarkkuus on tyydyttävä ja aiheutuu pääosin ajolinjaeroista.

Mittaustarkkuuden riittävyys

Mittausten tarkkuusvaatimukset riippuvat yleensä käyttötarkoituksesta. Teollisuudessa pätee usein sääntö, että mittaustarkkuus riittää prosessin hallintaan erittäin hyvin, kun gageRR% on alle 10 %, mutta yli 30 %:n arvoilla mittaustarkkuuden ei katsota soveltuvan teollisuuden prosessien hallintaan. Niiden välissä soveltuvuus riippuu mittausepävarmuudesta johtuvien virhepäästöskustannusten suuruudesta [43, 44]. Laadunparannusprojekteissa pyritään 10 %:n tarkkuustasolle. Edellä mainitut tunnusluvut ovat suhteessa luokittelutarkkuuteen siten, että gageRR%:n ollessa 30 % mitattu tieto pystytään luokittelemaan viiteen luokkaan. Ellei luokittelutarkkuus saavuta viittä luokkaa, katsotaan sen olevan liian huonon.

Syntyvien riskien suuruus riippuu karkeuteen liittyvästä päätöksentekotilanteesta. Tavallisesti tilanne on se, että tilaaja hyväksyy tai hylkää ne tuottajan operoimat tiejaksot, joilla mitattu tunnusluku alittaa tai ylittää tietyn raja-arvon (Kuva 15). Mitattuun arvoon liittyy mittausrvirhettä, joka aiheuttaa sen, että tilaaja voi tehdä tuotetta hyväksyessään tai hylätessään virhepäätöksen. Osassa virheellisistä päätöksistä päätös on haitallinen tilaajalle ja osassa päällysteen tuottajalle. Virhepäätösten suuruutta ei pysty kovin tarkasti määrittämään ennen kuin karkeuteen liittyvä käyttötilanne on määritelty.



Kuva 15. Virhepäätöstilanne. Tilaaja hyväksyy tuotteen/palvelun laatuvaatimusalueen sisällä olevat tuotteet (LSL-USL) ja hylkää sen ulkopuolella olevat tuotteet. Mittausvirhe vaikuttaa hylkäysrajan tuntumassa aiheuttaen väriä päätöksiä. Tilaajalle epäedullisia virhepäätöksiä sanotaan α -riskiksi ja tuottajalle epäedullisia virhepäätöksiä β -riskiksi. Riskien suuruus riippuu mitattavasta prosessivaihtelusta, mittausvirheestä ja laatuvaatimusrajoista.

Mittausvirheen vaikutusta virhepäätöksiin on simuloitu ura- ja kitkatiedolle (uratieo uuden päällysteen laatuvaatimukseksi tai kitkatieto talvihoidon laatuvaatimukseksi [54]). Tuloksena on saatu sellainen perussääntö, että kun mittausvirheen suhde kokonaisvaihteluun on 10 % niin tilaajan ja tuottajan riskit yhtyvät. Mittausvirheen kasvaessa virhepäätösten määrä myös kasvaa, mutta tuottajan riski kasvaa enemmän kuin tilaajan riski. Riskien suuruus riippuu tilanteesta. Hyvänä tavoitteena voisi siis olla, että kummankin osapuolen riskit olisivat yhtä suuret. Tiestömittauksissa on kuitenkin usein vaikea saavuttaa tuota tarkkuustasoa ja monien mitattavien tunnuslukujen mitausepävarmuus on välillä 10-20 % niiden kokonaisvaihtelusta. Karkeustiedon käytössä olisi hyvä tehdä virhepäätössiin simulointi huomioiden myös riskeistä eri osapuolille aiheutuvat kustannukset ja määrittää arvonmuutosperusteet siten, että syntyvä riskiasetelma olisi tasapuolinen.

Mega- ja makrokarkeustiedon mittaamisen tarkkuus on päällysteiden karkeustilanteen selvittämiseen nähden tyydyttävällä tasolla ja täyttää esim. PTM-mittausurakassa olevat laatuvaatimukset. Jos karkeustietoa käytetään hankkeissa hyväksymiskriteerinä ja arvonmuutosperusteena, niin mittaustarkkuus saisi olla hiukan parempi. Lisäksi mittausperiaatteet tulisi määrittää yksityiskohtaisemmin, koska pintakarkeuden mittausperiaatteet (antureiden resoluutiot, näytteenottotiheys, tunnusluvut ja niiden aallonpituusalueet) voivat vaihdella mittausten toimittajasta riippuen.

5 Karkeuden vaikutukset

5.1 Ajomukavuus

Melu ajoneuvossa

Melu ajoneuvossa vaihtelee voimakkaasti sen mukaan minkälaisella autolla ja millä nopeudella ajetaan. Eräiden tutkimusten mukaan meluerot huonoimman ja parhaan ajoneuvon välillä voivat olla jopa 6.6 dB. Kuitenkin myös päällysteellä on suuri vaikutus ajoneuvon sisällä kuultavaan meluun. Nopeudella 80 km/h tehtyjen mittausten mukaan ero karkean ja sileän päällysteen välillä on jopa 5 dB. Nopeudella 100 km/h ero urien pohjassa ja urien vieressä tuotti yli 4 dB:n eroja melutasossa ajoneuvon sisällä. Päällysteen makrokarkeuden vaikutus meluun ajoneuvossa on suurempi kuin eri renkaiden vaikutus. [28].

Makrokarkeuden (MPD) vaikutus ajoneuvon sisällä koettavaan meluun on selvempi kuin sen ulkopuoliseen meluun [6].

Tärinä ajoneuvossa

Ajoneuvoon voi vaikuttaa useita eri tärinälähteitä, joilla on eri taajuus. Ihmisen keho on herkimmillään taajuusalueen 10-15 Hz taajuuksille. EY:n tärinädirektiivissä on annettu ohjeita, joiden mukaan käsi- ja kehotärinälle on asetettu maksimiarvot siten, että kahdeksan tunnin vertailu aikaan standardoidun päivittäisen altistuksen raja-arvot ovat käsitärinälle 2.5 m/s^2 ja kehotärinälle 0.5 m/s^2 . Vastaavat raja-arvot ovat 5.0 m/s^2 ja 1.15 m/s^2 [10].

Käsitärinän altistustason arviointi perustuu kahdeksan tunnin vertailu aikaan standardoidun päivittäisen altistuksen arvon laskemiseen. Arvo ilmoitetaan taajuuspainotetun kiihtyvyyden tehollisarvojen neliöiden summan neliöjuurena ja se on määritetty standardissa (ISO 5349-1) [10].

Kehotärinän altistustason arviointi perustuu kahdeksan tunnin vertailu aikaan standardoidun päivittäisen altistuksen arvon laskemiseen. Arvo ilmoitetaan 8 tuntia vastaavana jatkuvana kiihtyvyytenä ja lasketaan taajuuspainotettujen kiihtyvyyksien suurimpana tehollisarvona tai suurimpana tärinäannoksen arvona (VDV), jotka on määritetty kolmessa toisiaan vastaan kohtisuorassa suunnassa. Altistus määritellään standardin ISO 2631-1 mukaisesti [10].

Ruotsalaisessa tutkimuksessa on todettu, että huonokuntoisilla alemman luokan teillä direktiivin mukaiset raja-arvot ylittyvät raskaan ajoneuvon kohdalla helposti. Suurimmat tärinän ja heilahdusten aiheuttajat ovat yksittäisepätasaisuudet, muutokset sivukaltevuudessa, reunapainaukset ja megakarkeuden aallonpituusalueella oleva epätasaisuus [16].

Tärinämekanismissa autotekniikan ja tietekniikan välillä toimii linkkinä luontevasti ajonopeus. Autotekniikassa asioita mitataan ja niistä keskustellaan usein ajallisen riippuvuuden kautta (time domain) kun taas tietekniikka perustuu pituusmittoihin ja etäisyyksiin (distance domain). Näiden välille silta rakentuu ajonopeuden kautta eli

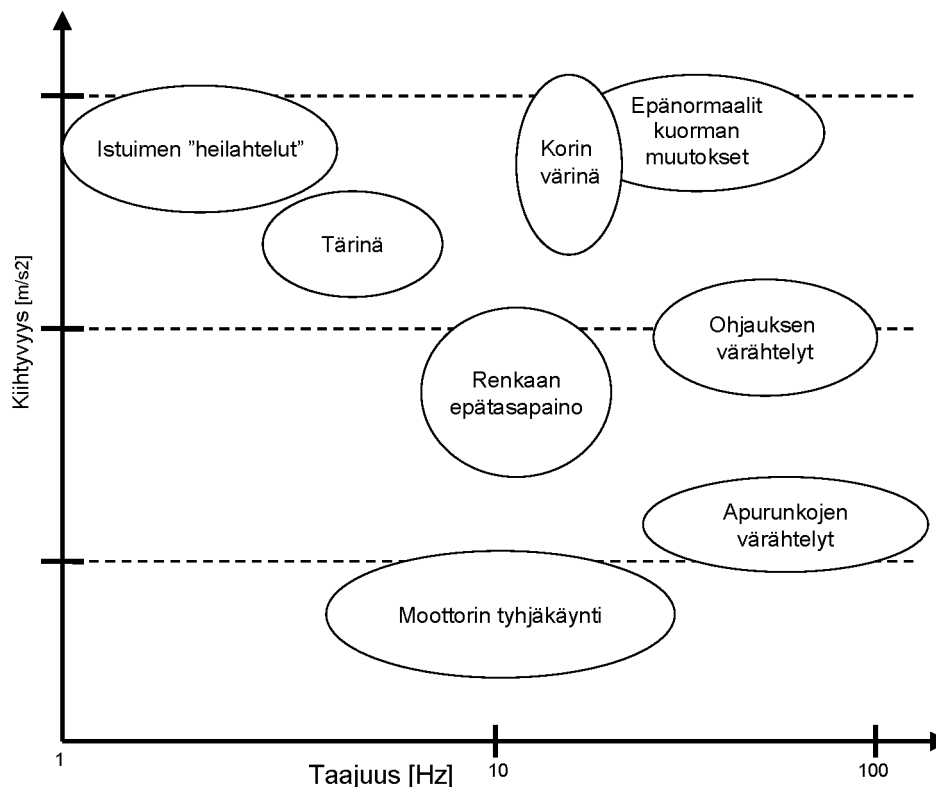
missä ajassa auto kulkee jonkin matkan ja mitä muutoksia (tiessä) auto kohtaa tämän matkan aikana (Taulukko 5) [53].

Taulukko 5. Ajoneuvossa koettavan värinän taajuuden riippuvuus ajonopeudesta [53].

Nimike SAE	Ajotuntuman luonnehdinta	Taajuus f	Aallonpituus L 50 km/h ajonopeudella	Aallonpituus L 80 km/h ajonopeudella	Aallonpituus L 120 km/h ajonopeudella
ride	ajo, "olipa tasainen kyyti"	< 5 Hz	$L > 2,8$ m	$L > 4,4$ m	$L > 6,7$ m
shake	tärinä, "auto vapisi"	$5 < f < 25$ Hz	$0,6 \text{ m} < L < 2,8, \text{ m}$	$0,9 \text{ m} < L < 4,4, \text{ m}$	$1,3 \text{ m} < L < 6,7, \text{ m}$
harshness	karheus, aistitaan myös äänenä, "karkea tie"	$25 < f < 100$ Hz	$0,14 \text{ m} < L < 0,6 \text{ m}$	$0,2 \text{ m} < L < 0,9 \text{ m}$	$0,3 \text{ m} < L < 1,3 \text{ m}$
noise	melu	$100 < f < 22$ kHz	$0,6 \text{ mm} < L < 0,14 \text{ m}$	$1 \text{ mm} < L < 0,22 \text{ m}$	$1,5 \text{ mm} < L < 0,3 \text{ m}$

SAE = Society of Automotive Engineers

Huomattavaa mukavuuden käsitteen kohdalla on sen nopeahko ajallinen muuttuminen. Autot joita pidettiin 20 vuotta sitten mukavina ja hiljaisina ovat nykyään keskinertaisia tai heikkoja. Lisäksi kuljettaja ja matkustaja kokevat melun ja värinän hyvin eritavalla, jopa sama henkilön ärsyyntymiskynnys vaihtelee selkeästi riippuen hänen mielentilastaan, väsymyksestä, matkan tarkoituksesta ja niin edelleen.



Kuva 16. Värinän lähteitä ja suuruuksia ajoneuvossa [9].

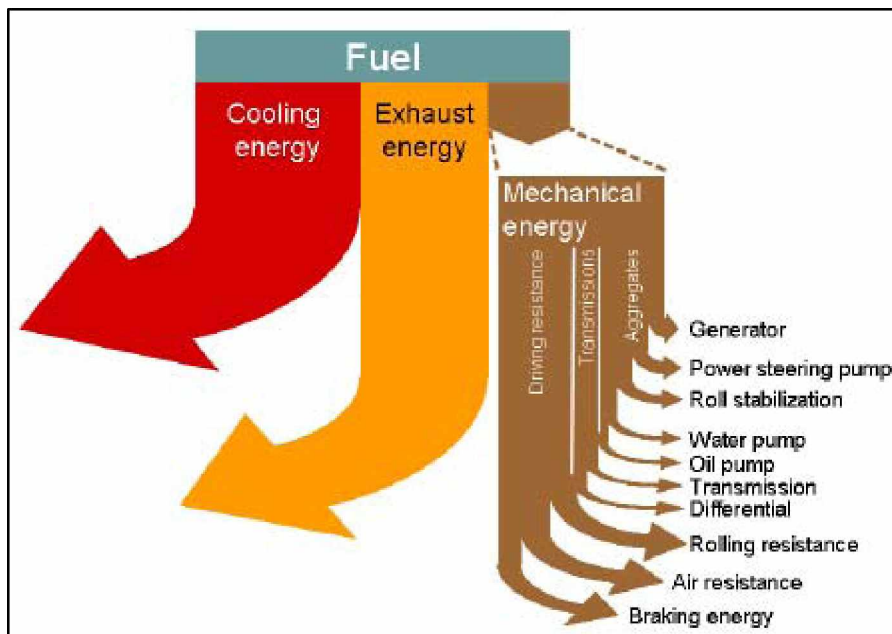
Autotekniikan kehittyessä myös melun ja värinän lähteiden keskinäinen järjestys muuttuu. Aikajänne tällaisille muutoksille on suhteellisen nopea eli luokkaa 10-20 vuotta. Suomalainen autokanta mielletään yleisessä keskustelussa niin vanhaksi, että 10 vuotta tuntuu pieneltä ajalta, mutta autokanta kuitenkin uusiutuu koko ajan. Moottoritekniikan kehittäminen ja aerodynamiikan parantuminen vähentävät värinää ja pienentävät sekä polttoaineen kulutusta että merkittävässä määrin ajoviimasta johtuvaa melua (aeroakustiikka).

5.2 Polttoainetalous

Ajoneuvokustannukset koostuvat kiinteistä kustannuksista ja muuttuvista kustannuksista. Kiinteitä kustannuksia ovat ajoneuvon hankinnasta syntyneet pääoman kuole- tus ja korkokulut sekä erilaiset kiinteät, vakuutus- yms. maksut. Muuttuvia kustan- nuksia ovat ajosuoritteesta riippuvat kustannukset kuten polttoainekustannukset, huoltokustannukset ja rengaskustannukset.

Muuttuvista kustannuksista tärkeimmät ovat polttoaine- ja huoltokustannukset sekä rengaskustannukset. Kustannusrakenne poikkeaa raskailla ajoneuvoilla kevyiden ajo- neuvojen kustannusrakenteesta.

Henkilöautoilla suurin osa käytetystä energiasta menee moottorin jäähdytykseen ja häviöihin ja vain 12-20 % siitä päätyy lopulta voimansiirron kautta vetäville pyörille (Kuva 17). Vierintävastus käyttää noin kolmanneksen tästä pyörille siirtyvästä energi- asta. Tällä tavalla tarkasteltuna vierintävastus ottaa vain murto-osan käytetystä energiasta. Toisaalta kun vierintävastuksen voittamiseen tarvitaan vähemmän ener- giaa, tarvitaan sitä mekaanisiin häviöihin vähemmän ja sitä kautta vierintävastuk- sen alentamisella on kerrannaisvaikutuksia. Suurimmalla osalla henkilöautoja 10 % vähentyminen vierintävastuksessa parantaa ajoneuvon polttoainetaloutta noin 2 %:lla [13]. Vastaava muutos vierintävastuksessa aiheuttaa raskailla ajoneuvoilla noin 5 %:n (3-6%) säästön polttoaineen kulutuksessa.



Kuva 17. Polttoaineesta saatava energia kuluu useisiin eri kohteisiin. Energian käyttö kohdistuu pääosin vierintä- ja ilmanvastuksen voittamiseen ja li- sälaitteiden käyttämiseen, ja vain murto-osa kuluu itse vierintävastuk- sen voittamiseen.

Vierintävastus

Tien päällysteen vaikutus ajoneuvon energiankulutukseen voidaan jakaa seuraaviin mekanismeihin:

- Vierintävastus: Energia kuluu renkaan kylkien, rungon ja kulutuspinnan muodonmuutoksiin. Tähän vaikuttavat erityisesti sellaiset päällysteen pinnan muutokset, jotka ovat renkaan kosketusalan mittakaavassa (käytännössä karkeus).
- Jousitushäviöt: Epätasaisuus eli edellistä suuremman aallonpituuden vaihtelu päällysteen pintageometriassa, erityisesti auton akselivälin mittakaavassa tai sitä suurempi, aiheuttaa energian kulumista ajoneuvon jousituksen liikkeisiin.
- Renkaan sortokulma (slide slip), joka aiheutuu sivutuulesta, tien rakenteesta tai kuluneisuudesta (sivukaltevuus, urautuneisuus) ja renkaan asennosta (auraus, camber).
- Pitkittäinen luisto, joka johtuu vetovoiman tuottamisesta.

Vierintävastuksen suuruus on noin henkilöautoilla yhden prosentin verran pyöräpainosta ja raskailla ajoneuvoilla hiukan alle prosentin. Siihen ei vaikuta merkittävästi ajoneuvon nopeus. Nopeudella 100 km/h henkilöauto tarvitsee noin 50 % käyttämästään energiasta vierintävastuksen voittamiseen. Raskas ajoneuvo tarvitsee 80 km/h nopeudella noin 40 % käyttämästään energiasta vierintävastuksen voittamiseen. Käytännössä epätasaisen ajamisen ja muiden olosuhdetekijöiden takia esitetyt prosenttiosuudet ovat pienempiä [15].

Taulukko 6. Tutkimuksissa saatuja vierintävastuksen arvoja eri päällysteillä [30].

Road surface	Location	cR [%]
Cement concrete with burlap - smooth	Germany A4	0,86
Stone mastic asphalt 0/8	Germany A4	0,86
Double layer porous asphalt 2/6	Netherlands A15	0,97
Double layer porous asphalt 4/8	Netherlands A15	1,02
Cement concrete transversely brushed - rough	Netherlands A59	1,04
Single layer porous asphalt 6/16	Netherlands A59	1,05
Dense asphalt concrete 0/16	Netherlands A15	1,09
Gussasphalt 0/11	Germany A4	1,18

Vierintävastukseen vaikuttavat tekijät voidaan eritellä esim. Taulukon 7 mukaisiin ryhmiin. Päällysteeseen liittyvistä tekijöistä vierintävastuksen kannalta tärkeimmät ovat pituuskaltevuus, epätasaisuus, megakarkeus, makrokarkeus ja päällysteen jäykkyys. Pituuskaltevuuden osuus vierintävastukseen on selkeä ja se pyritään yleensä vakioimaan tutkimuksissa. Päällysteen jäykkyyden vaikutusta on tutkittu vertaamalla vierintävastusta asfalttipäällysteillä ja betonipäällysteillä. Betonipäällysteellä vierintävastus on pienempi kuin asfalttipäällysteellä.

Vierintävastuksiin liittyvissä tutkimuksissa on useimmiten mukana tien pinnan parametreista joko tien makrokarkeus, megakarkeus tai epätasaisuus. Harvoin löytyy tutkimusta, missä olisivat mukana kaikki edellä mainitut ja riittävällä arvoalueella. On myös tutkimuksia, joissa aallonpituusalueita ei eritellä vaan käsitellään karkeutta ja epätasaisuutta jakamatta sitä eri tunnuslukuihin.

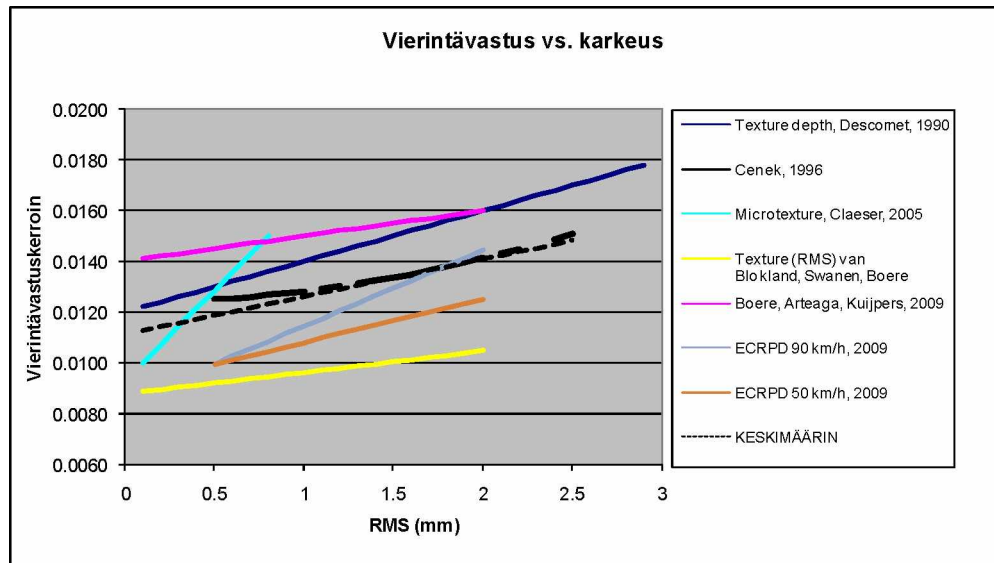
Tutkimusten tulokset ovat hyvin hajanaisia ja niitä on vaikea verrata toisiinsa. Syynä on usein se, että niitä on tehty eri lähtökohdista ja hyvin erilaisilla koejärjestelyillä. Osa tärkeistä tekijöistä jää usein huomiotta. Tien pinnan ominaisuuksiin liittyvien tekijöiden vaihtelualue on usein liian kapea. Lisäksi monet olosuhdetekijät eivät ulotu Pohjoismaisiin olosuhteisiin.

Taulukko 7. Vierintävastukseen vaikuttavia tekijöitä (testaustilanteessa)[15].

Tien pinta	Olosuhteet	Rengas
Mikrokarkeus	Nopeus	Geometria/mitat
Makrokarkeus	Pyöräpaino	Materiaalit
Megakarkeus	Rengaspaine	Suunnittelu
Epätasaisuus	Pyörän suuntaus	Lämpötila
Jäykkyys	Lämpötila	
Lämpötila	Tuuli	
Pituuskaltevuus		

Päällysteiden ominaisuudet voivat enimmillään kaksinkertaistaa vierintävastuksen suuruuden. Polttoaineen kulutuksessa tämä vastaa noin 10 % kulutuslisää. Testausolosuhteissa vierintävastuksen ja mikro-, makro- ja megakarkeuksien välille on saatu korrelaatiot 0.97, 0.89 ja 0.74 [15]. Vierintävastuksiin vaikuttaviksi tietekijöiksi raportoidaan useimmiten makrokarkeus ja epätasaisuus. Kuvassa 18 on kooste eräistä tutkimustuloksista karkeuden vaikutuksesta vierintävastukseen. Tulosten vertailtavuutta haittaavat epäyhtenäiset esitystavat. Tutkimuksissa ei ole aina täsmennetty sitä, minkä aallonpituusalueen karkeuksista on kyse ja niinpä ne voivat sisältää joko mikro-, makro-, megakarkeutta tai niitä kaikkia samanaikaisesti. Joskus karkeus ilmoitetaan desibeleinä yhden mikrometrin vertailutasoon verrattuna. Karkeuden vaikutusten kulmakertoimet ovat kuitenkin usein hyvin yhteneväiset. Kuvan ääritilanteiden välinen ero on noin 100 %.

Tutkimuksissa ei kerrota siitä, miten karkeuden suunta mahdollisesti vaikuttaisi vierintävastukseen.



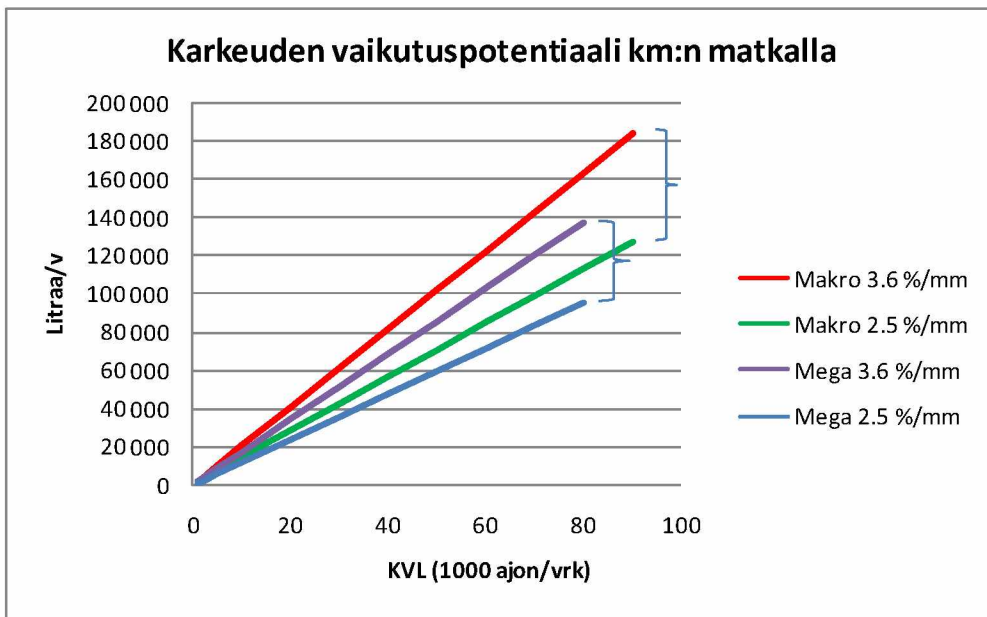
Kuva 18. Kooste karkeuden vaikutuksesta vierintävastuskertoimeen. Karkeuden yhden yksikön muutos kasvattaa vierintävastuskertoainta keskimäärin 12.4 %. (Huom. tutkimusmenetelmät ja karkeuden määrittäminen vaihtelevat).

Polttoaineen kulutus

Karkeuden vaikutus polttoaineen kulutukseen on laskettavissa karkeuden vaihtelualueen ja vaikutussuoran avulla. Makrokarkeuden vaihtelualue on noin 0.2-2.5 mm ja megakarkeuden vaihtelualue noin 0.15-2.0 mm. Karkeuden vaikutus vierintävastukseen on noin 12.4 %/mm. 10 % muutos vierintävastuksessa aiheuttaa henkilöauton polttoaineen kulutukseen noin 2 %:n (1.8-3.8%) kasvun ja raskaan ajoneuvon polttoaineen kulutukseen noin 5 % (3.1-6.6%) kasvun. Näistä tiedoista on laskettavissa karkeuksien vaikutuspotentiaalin suuruus. Tosin on muistettava, että kaikissa luvuissa on vaihtelua.

Karkeuksien vaihtelualueen ääriarvoilla laskettuna karkeuden vaikutus vierintävastuksen lisääntymiseen ja sitä kautta polttoaineen kulutukseen on suurilla liikennemäärillä merkittävä (Kuva 19). Nyt tiedossa olevien tutkimustulosten perusteella makrokarkeuden vaikutuspotentiaali olisi suurempi kuin megakarkeuden vaikutuspotentiaali. Megakarkeuden vaikutusta vierintävastukseen ja polttoaineen kulutukseen on tutkittu melko vähän.

Laskelmaa voidaan soveltaa vain kohdekohtaisesti. Esimerkiksi vilkasliikenteisellä tiellä, jolla keskimääräinen vuorokausiliikenne on noin 80 000 ajon/vrk, voisi karkeuksien ääriarvojen perusteella laskettu polttoaineen kulutuksen säästö olla luokkaa 100 000 litraa vuodessa.



Kuva 19. Karkeuksien ääriarvojen perusteella laskettu vaikutuspotentiaali yhden vuoden kulutukseen yhden km:n matkalla liikennemäärän funktiona. Vaikutusvaihtoehdot 2.5 ja 3.6 % karkeuden yksikköä (mm) kohti.

Verkkotasoinen laskelma

Karkeuden muuttumisen vaikutuksia polttoaineen kulutukseen on arvioitu seuraavalla laskelmalla. Lähtötietoina ovat tieverkon liikennesuorite sekä karkeusjakauma sekä tarvittavat peruslähtötiedot Ajokustannukset 2005 –julkaisusta. Yksityiskohtainen laskelma edellyttäisi monien lähtötietojen tarkempaa määrittämistä. Tässä yhteydessä on tehty vain hyvin karkea ja suuntaa antava laskelma, jolloin lähtötiedotkin ovat karkeita.

Lähtökohdaksi on otettu vuoden 2007 liikennesuorite kolmeen eri ajoneuvoryhmään jaoteltuna sekä polttoaineen kulutuksen keskiarvot (litraa/100 km), polttoainekustannusten keskiarvot (€/ajonkm) sekä päästöjen (CO₂ ekvivalenttipäästöt) keskiarvot (g/ajonkm).

Tämän jälkeen on käytetty kuvan 20 mukaista kevätmittausten 2009 makrokarkeusjakamaa, johon on tehty vaihtoehtoja siten, että karkeusjakauma muuttuu pienempään suuntaan kuitenkin siten, että karkeuden minimiarvot eivät muutu. Tällöin vain jakaumat muuttuvat eli tulevat huipukkaammiksi ja suurten arvojen (esim. >0.8) osuus vähenee.

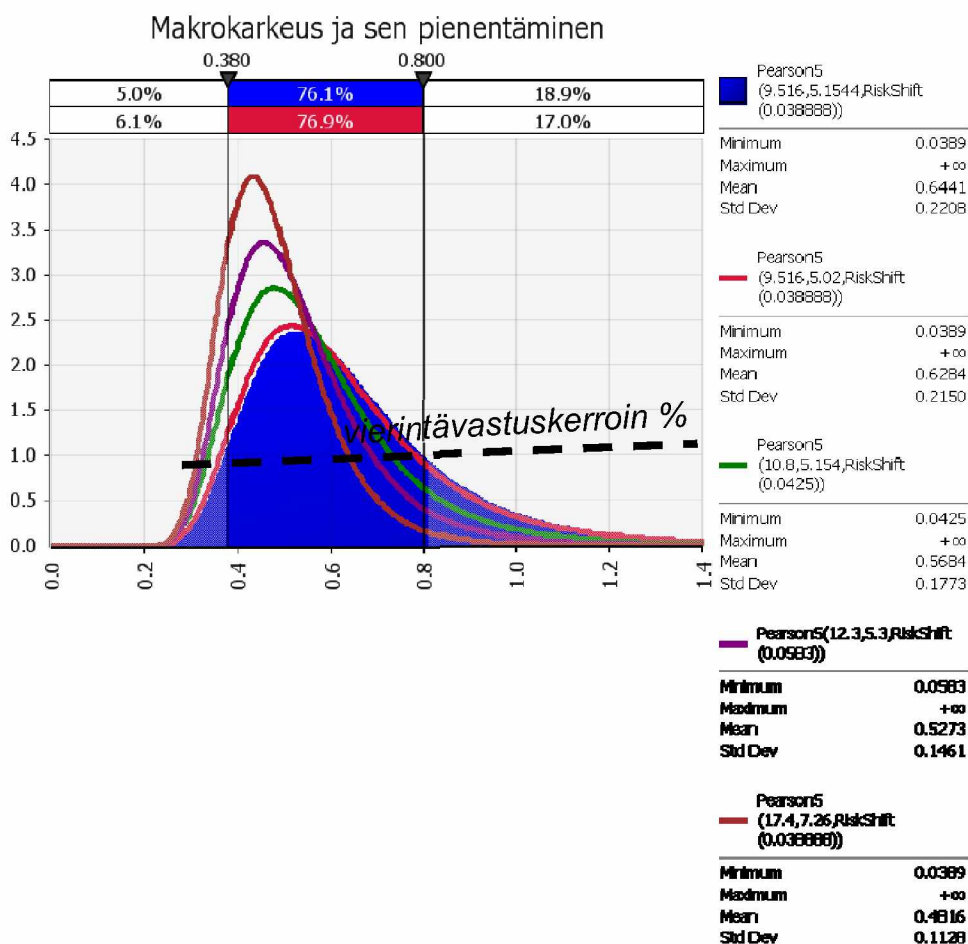
Lähtötilanteessa liikennesuorite on 35.8 Mrd.ajonkm/v. Siitä aiheutuu laskennallinen 3912 miljoonan litran polttoaineen kulutus ja 9105 miljoonan kg:n CO₂-ekv-päästöt sekä 1416 M€:n polttoainekulut. Nämä luvut vastaavat koko vuoden tuloksia.

Taulukossa on esitetty miten kulutus, kustannukset ja päästöt muuttuisivat jos karkeusjakauma muuttuisi neljällä eri vaihtoehdolla. Lähtötilanteessa karkeitä päällysteitä (makrokarkeus>0.8) olisi noin 18.9 %, sekä vaihtoehdossa 1-4 17 %, 9.6%, 5.0 % ja 1.4%. Vaihtoehto 4 edustaisi tilannetta, jota paremmaksi päällysteiden karkeusjakaumaa tuskin enää saataisiin.

Päällysteiden pintakarkeuksien pienentämisellä saavutettava säästöpotentiaalia olisi siten polttoainekustannuksina noin 22 M€ vuodessa ja hiilidioksidipäästöinä noin 140 milj.kg. Laskelmassa ei oteta kantaa siihen millä tavalla päällysteiden karkeusjakauma saataisiin paremmaksi.

Taulukko 8. Laskelma karkeuden muutosten kustannusvaikutuksista.

Erä	Yksikkö	Kevyt	Raskas	Yhdistelmä	Yhteensä	Säästöt yhteensä			
Liikennesuorite	milj.ajonkm	32641	1293	1870	35803	PA-kustannussäästö	PA-kustannussäästö	PA-kustannussäästö	CO2 säästö
Keskim. Kulutus	l/100km	8.2	29.3	45.8					
pa-kust	€/ajonkm	0.03	0.11	0.17					
pa-kulutus	milj.litraa	2677	379	856	3912				
Polttoainekust	M€/v	950	143	323	1416				
CO2-eq.	g/ajonkm	177	824	1209		M€/v	%	Milj.litraa	Milj. kg
CO2-eq. päästöt	milj.kg	5779	1065	2261	9105				
Lähtötilanne	18.9 %	0.933	0.896	0.957					
Muutos (karkeus yli 0.8)									
Vaihtoehto 1	17.0 %	949	149	314	1411	-4.0	-0.28 %	-11	-26
Vaihtoehto 2	9.6 %	943	148	313	1404	-11.5	-0.81 %	-32	-74
Vaihtoehto 3	5.0 %	940	147	311	1399	-16.6	-1.18 %	-46	-107
Vaihtoehto 4	1.4 %	936	147	310	1393	-22.4	-1.58 %	-62	-144



Kuva 20. Makrokarkeuden lähtöjakauma (sininen alue) sekä siihen modifioidut uudet jakaumat (eriväriset jakaumakäyrät).

5.3 Muut ajoneuvokustannukset

Renkaiden kuluminen

Renkaiden kunnolla on oma merkityksensä ajoneuvon ja tien pinnan välisen kontaktin toimivuudessa. Renkaat ovat ajoneuvoissa eräs selvimmin kuluva osa. Uusia kesärenkaita myydään henkilöautoihin noin 1.1 milj. kpl ja talvirenkaita noin 1.4 milj. kpl vuosittain. Raskaiden ajoneuvojen renkaita myydään noin 350 000 kpl vuodessa [22]. Jos esimerkiksi henkilöauton renkaan hinta on 100 €/kpl, niin henkilöautojen rengaskustannukset olisivat noin 250 milj. € vuodessa. Tämä on noin 0.5 senttiä/ajokm. Tie liikenteen rengaskustannukset ovat siten suuruusluokaltaan yhtä suuret kuin maanteiden ylläpitokustannukset (päälysteet, sillat, soratiet, varusteet) ja noin kaksinkertaiset päälysteiden ylläpitokustannuksiin nähden.

Renkaiden kulumiseen vaikuttavat erittäin paljon ajoneuvon kuormaus sekä renkaiden tyyppi, paineet ja suuntaus. Lisäksi merkittävä vaikuttaja on ajotapa. Tien pinnan vaikutuksesta renkaiden kulumiseen on viittauksia [27], mutta varsinaisia tutkimuksia ei ole saatavissa kovin helposti. Erään melko vanhan tutkimuksen [48] mukaan karkean pinnan kuluttava vaikutus voi olla jopa kolminkertainen sileään pintaan verrattuna.

Tien ominaisuuksista päälysteen karkeus on tärkein renkaan kulumiseen vaikuttava tekijä, mutta myös epätasaisuudella on lievä vaikutus. Nykyisin käytettävillä tunnusluvuilla mitaten vaikuttavat tekijät lienevät mikro-, makro- ja megakarkeus.

Ajoneuvon kuluminen

Ajoneuvojen kulumisesta ja rikkoontumisesta aiheutuvat korjaus- ja huoltokustannukset ovat noin 15 % ajoneuvokustannuksista. Ajoneuvojen kulumisen ja korjaustarve riippuu pääasiassa ajomäärästä ja merkittävästi myös ajotavasta. Tiessä olevat huonokuntoisuus aiheuttaa kuitenkin lisäkustannuksia lisäkulumisen tai rikkoontumisen muodossa. Päälysteen pinnan kunnosta lähinnä epätasaisuus ja megakarkeus aiheuttavat alustan ja nivelten kulumista ja rikkoontumisia, joista aiheutuu lisäkustannuksia. Myös päälysteessä olevat reiät aiheuttavat kulumista tai rikkoontumista. Karkeuden eri osatekijöiden vaikutuksista ei ole kovin helposti saatavissa numeerisia tuloksia.

Tien pinnan ominaisuuksista megakarkeus ja epätasaisuus ovat suurimmat ajoneuvoja kuluttavat tekijät.

5.4 Turvallisuus

Vaikutus kitkaan

Liikenneonnettomuuksissa ajoneuvot osuvat toisiinsa tai suistuvat tieltä. Usein syynä on tien ja renkaan välisen kitkan vähäisyys. Suomessa talviolosuhteet vaikuttavat erittäin paljon kitkaolosuhteisiin. Jäisillä keleillä pinta kuin pinta on jääpeitteinen ja kitkaolosuhteet siten huonot. Liukkaudentorjunnan keinoin sitä kuitenkin pyritään parantamaan. Kesällä kitka heikentyy märällä kelillä ja varsinkin silloin kun ajourissa on riittävästi vettä. Yleensä todetaan, että Suomen olosuhteissa kesäajan kitka on riittävä. Liikenteessä on noin 400 000 huonokuntoisilla kesärenkailla varustettua ajo-

neuvoa. Huonokuntoisten renkaiden onkin todettu olevan merkittävä onnettomuuksien syy [21]. Noin 70 % huonokuntoisiin renkaisiin liittyvistä onnettomuuksista tapahtuu märällä, sohjoisella, lumisella tai jäisellä tiellä. Noin 8 ‰ mären kelin henkilövahinko-onnettomuuksista johtuu vesiliirrosta [8]. Vesiliirto-onnettomuuksissa päätekijöitä ovat huonot renkaat tai urainen päällyste. Tie-rengas-kontakti on tavalla tai toisella syynä merkittävään määrään onnettomuuksia.

Tien päällysteen ja ajoneuvon renkaan välinen kitka muodostuu kahdesta osasta, jotka ovat adheesio ja hystereesi (Kuva 21). Adheesiovoima vastustaa renkaan kumin liukumista tien pinnan suhteen vaikuttaen kosketuspinnan suunnassa. Hystereesivoima kohdistuu renkaan ja tien kosketuspinnan suhteen kohtisuorassa suunnassa aiheuttaen painetta renkaan ja tien päällysteen kivirakeiden välille lisäten siten liukumista vastustavaa kitkavoimaa.

Adheesiovoimat riippuvat lähinnä päällysteen mikrokarkeudesta ja vaikuttavat eniten alhaisilla nopeuksilla. Hystereesivoimat riippuvat makrokarkeudesta ja kasvavat nopeuksien kasvaessa. Mikrokarkeuden vaikutus korostuu liittymissä ja taajama- ja kaupunkiolosuhteissa ja vastaavasti makrokarkeuden vaikutus maanteillä. Makrokarkeuden MPD-arvon on todettu olevan vaikutuksiltaan kahtalainen, uusilla päällysteillä kitkan on todettu kasvavan kun MPD kasvaa, mutta päällysteiden ikääntyessä MPD:n edelleen kasvu onkin vaikuttanut kitkaa alentavasti [55].

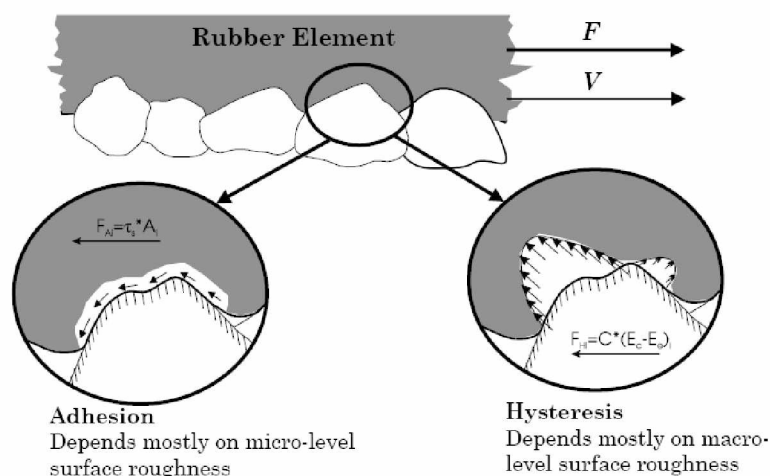


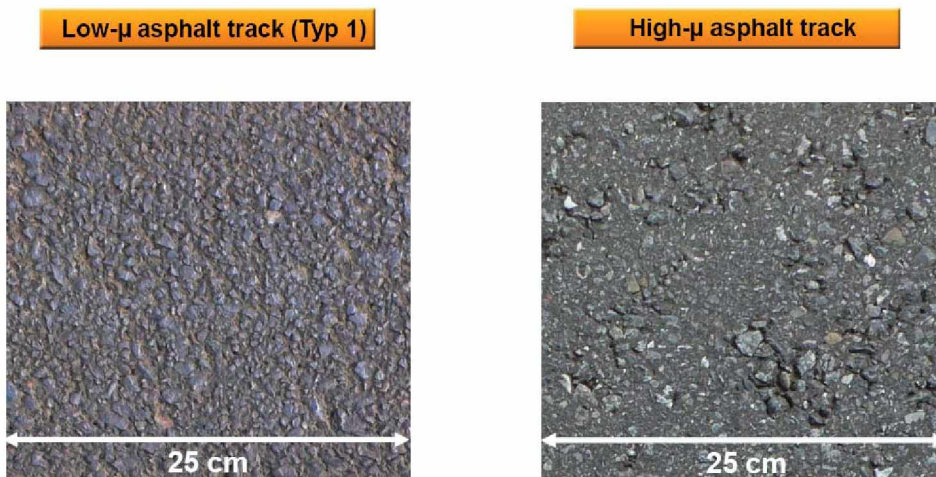
Figure 15. Key mechanisms of pavement–tire friction.

Kuva 21. Päällysteen ja renkaan välinen kitkamekanismi.

Tien ylläpitäjän mahdollisuudet vaikuttaa renkaan ja tien pinnan väliseen kitkaan ovat päällysteen pinnan ominaisuudet ja liukkaudentorjunnan keinot.

Taulukko 9. Kitkaan vaikuttavat tekijät (tärkeimmät lihavoitu).

Päällysteen pinta	Ajotapa	Rengas	Ympäristö
Mikrokarkeus	Luistonopeus	Kosketusala	Lämpötila
Makrokarkeus	* ajoneuvon nopeus	Suunnittelu	Tuuli
Megakarkeus	* jarrutus	Kumin koostumus ja kovuus	Vesi, lumi, jää
Epätasaisuus	Ajotilanne	Rengaspaine	Liukkauden torjunta
Materiaali	* kääntyminen	Kuorma	Lika
Pinnan lämpötila	* ohittaminen	Lämpötila	



Kuva 22. Matalamman (vasen) ja korkeamman (oikea) kitkan päällysteitä. Oikeanpuoleisen kuvan päällysteellä on muitakin hyviä ominaisuuksia; pienempi melu ja vierintävastus. Sen karkeuden suunta on negatiivista.

5.5 Ympäristö

Melu

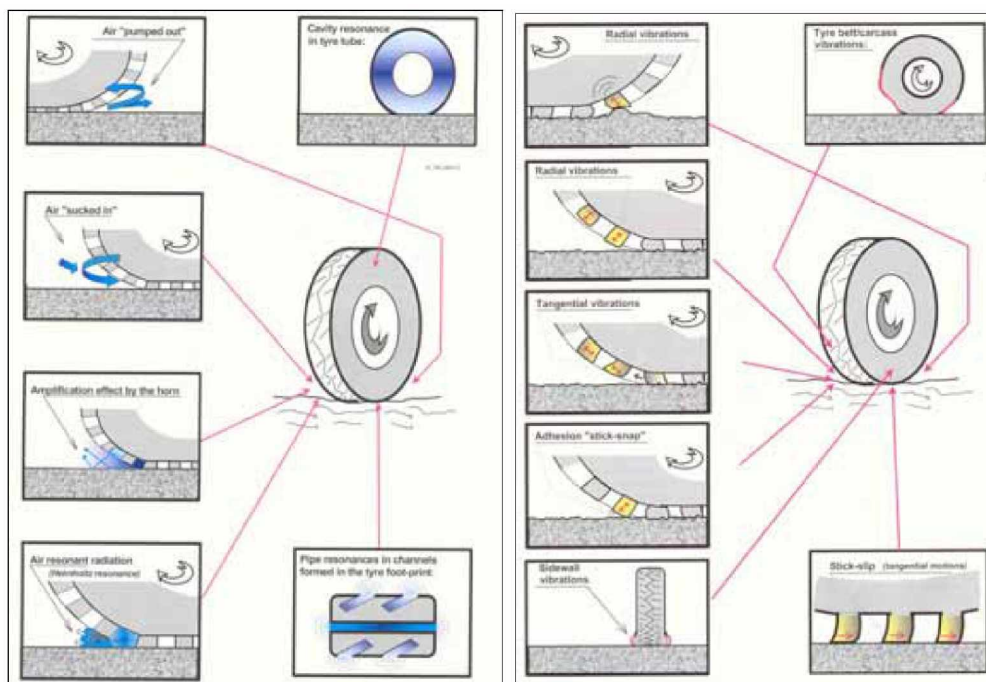
Tiellä kulkevan liikennevirran ympäristöön aiheuttamaa melua mitataan desibeleissä. Yleiset ohjearvot liikennemelulle ovat päiväaikaan 55 dB ja yöllä 50 dB. Melun merkitystä voidaan arvioida siitä aiheutuvan meluhaitan perusteella. Maanteiden liikennemelusta kärsii noin 350 000 ihmistä. Tästä syntyy noin 120 M€:n vuotuinen laskennallinen meluhaitta. Tämän lisäksi ajoneuvon sisällä häiritsevän melun kokevat kaikki ne kuljettajat ja matkustajat, jotka kulkevat meluisilla päällysteillä. Melun haittakustannukset ovat päällysteiden ylläpitokustannusten kanssa samaa suuruusluokkaa.

Liikennevirrasta ympäristöön aiheutuva melu riippuu monista eri tekijöistä, joista merkittävimmät ovat [46]:

- liikennemäärä ja liikennevirran koostumus
- tien päällyste (päällystetyyppi, kunto)
- ajotapa erityisesti alhaisilla nopeuksilla
- yksittäisten ajoneuvojen ominaisuudet (malli, akselipainot ja rakenne)
- ajoneuvojen renkaiden ominaisuudet (koko, pintakuvio, pintamateriaali, rengaspaine, lämpötila)

- nopeusrajoitus
- sääolot (tuuli, tien pinnan lämpötila ja kosteus)
- tien geometria (pituuskaltevuus, liittymät)
- liikenteen ohjaus (liikennevalot, hidastetöyssyt)

Ajoneuvojen melun lähteet voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: rengasmeluun, aerodynaamiseen meluun ja voimanlähteen meluun. Rengasmelu on näistä se osa, joka liittyy eniten tien pinnan ominaisuuksiin. Rengasmelu jaetaan kahteen pääryhmään, joita ovat syntymekanismi ja vahvistumismekanismi. Syntymekanismit voidaan jakaa kahteen pääryhmään: rakenteellisiin ja aerodynaamisiin, niiden syntyperiaatteen mukaan. Vahvistumismekanismit voidaan jakaa neljään pääryhmään. Mekanismien osat on esitetty kuvina seuraavassa kuvassa ja lueteltu yksityiskohtaisemmin liitteessä 5.



Kuva 23. Rengasmelun syntyyn ja kulkeutumiseen liittyviä mekanismeja [6].

Kokonaismelun kannalta tärkein melumekanismien osa on rakenteesta aiheutuva värähtely, missä renkaan palasten ja tien pinnan välisten iskujen ja adheesiovoimien seurauksena syntyy värähtelyä ja melua. Rengasmelun huippukohta osuu äänitaajuusalueella noin yhden kHz:n kohdalle, jolle ihmisen kuulon on todettu olevan herkimmillään (Kuva 24). Rengasmelun määrä riippuu ajonopeudesta ja sen osuus ylittää vakionopeudella ajettaessa moottorimelun kevyillä ajoneuvoilla nopeusarvoilla 15-35 km/h ja raskailla ajoneuvoilla 30-50 km/h [6]. Raskaiden ajoneuvojen aiheuttama melu on luonnollisesti suurempaa kuin henkilöautojen melu.

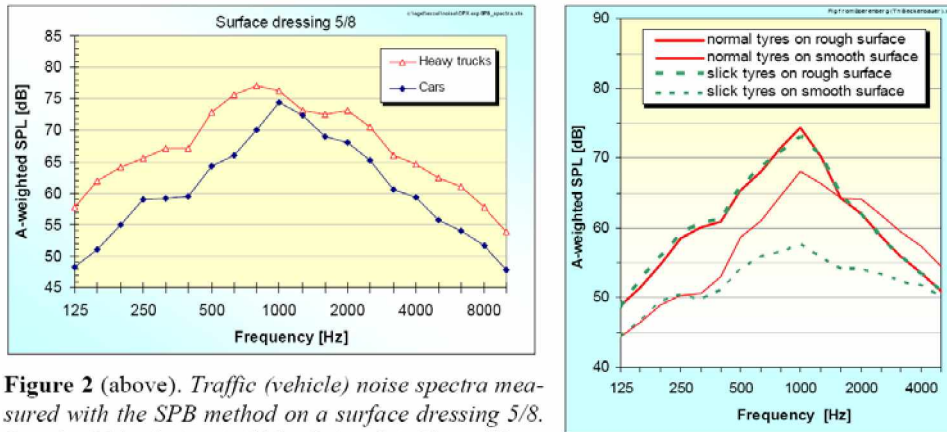


Figure 2 (above). Traffic (vehicle) noise spectra measured with the SPB method on a surface dressing 5/8. Speeds: 80 km/h (cars), 70 km/h (trucks). From [2].

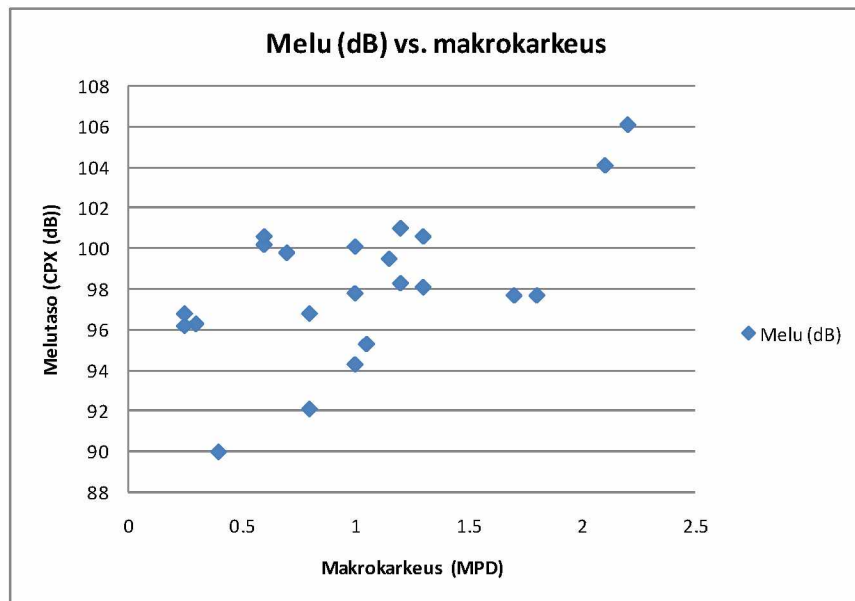
Kuva 24. Melun taajuusspektri. Melun huippu osuu taajuusalueella noin 1 kHz:n kohdalle. Vasen kuva: raskaan ajoneuvon aiheuttama melutaso on noin 5 dB suurempi kuin kevyen ajoneuvon, eron suuruus vaihtelee taajuuden mukaan. Oikea kuva: päällysteen pinnan karkeus vaikuttaa noin 5 dB taajuusalueelle 125-1000 Hz [49].

Selvimpiä meluun vaikuttavia päällysteen ominaisuuksia ovat makro- ja megakarkeus sekä huokoisuus (Taulukko 10). Yksinkertaistaen voidaan todeta, että päällysteen karkeus vaikuttaa mataliin äänitaajuuksiin, joustavuus keskitaajuuksiin ja huokoisuus korkeisiin äänitaajuuksiin. Melun kannalta hyvä päällyste on hienorakeinen, huokoinen ja joustava.

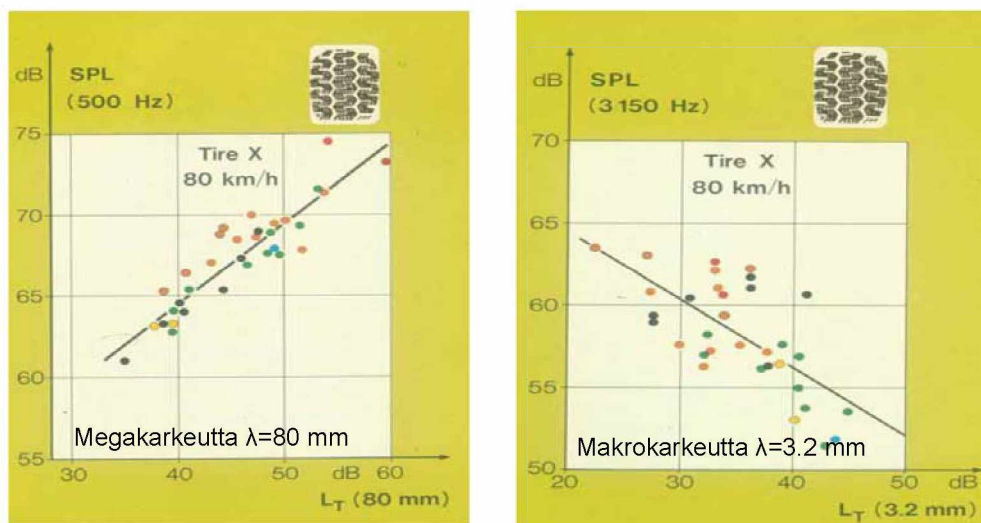
Taulukko 10. Meluun vaikuttavat päällysteen ominaisuudet (SILVIA 2005).

nro	Muuttuja	Vaikuttavuus
1	Mikrokarkeus	matala-vähäinen
2	Makrokarkeus	hyvin korkea
3	Megakarkeus	korkea
4	Epätasaisuus	pieni
5	Huokoisuus	hyvin korkea
6	Kerroksen paksuus	korkea huokoisilla päällysteillä
7	Adheesio (normaali)	matala-vähäinen
8	Adheesio (tangentialinen)	matala-vähäinen
9	Jäykkyys	vaikutus epävarma, vaatimaton?

Tien pinnan mega- ja makrokarkeus vaikuttavat meluun siten, että megakarkeuden lisääntyminen kasvattaa aina melua, mutta makrokarkeuden vaikutus meluun on kaksitahoinen (Kuvat 25 ja 26). Pitkien aallonpituuksien (>10 mm) makrokarkeus lisää matalataajuisia (alle 1000 Hz) melua. Lyhyiden aallonpituuksien makrokarkeus (0.5-10 mm) vähentää korkeataajuisia (>1000 Hz) melua [6].



Kuva 25. Rengasmelun arvoja erilaisilla päällysteillä[50]. Eräissä tutkimuksissa makrokarkeus korreloi paremmin ajoneuvon sisäisen melun kuin ulkoisen melun kanssa. Karkeuden ja melun välistä suhdetta sekoittaa se, että tiettyjen aallonpituuksien karkeus vähentää ja tiettyjen kasvattaa melua. Lisäksi myös karkeuden suunta vaikuttaa meluun.



Kuva 26. Erään vanhan tutkimuksen tuloksia mega- ja makrokarkeuden vaikutuksista meluun. Megakarkeudesta huomioitu vain aallonpituus 80 mm ja makrokarkeudesta 3.2 mm. Karkeuden desibelitaso 50 dB vastaa karkeuden arvoa 0.3 mm ja desibelitaso 60 dB arvoa 1 mm.

Tutkimustulokset ovat osin toisistaan poikkeavia. Suomessa tehdyissä kokeissa on havaittu, ettei makrokarkeuden ja melun välille ole saatu selvää yhteyttä [46].

Hiilidioksidipäästöt

Tieliikenteen hiilidioksidipäästöt aiheutuvat pääasiassa polttoaineen kulutuksesta. Tien pinnan ominaisuuksista aiheutuvat hiilidioksidipäästöt on laskettavissa polttoaineen kulutuksen kautta. Maanteiden liikenteestä aiheutuu CO₂-ekvivalentiksi

muunnettuja päästöjä noin 9100 miljoonaa kg/v. Pintakarkeuden muutosten vaikutus polttoaineen kulutukseen on henkilöautoilla noin 0.26 litraa/100 km mikä on noin 2.6 ml/km. Hiilidioksidipäästöjä syntyy keskimäärin henkilöautolle 170 g/ajonkm ja ras-kaammille ajoneuvoille vastaavasti enemmän (Taulukko 11). Pintakarkeuden parane-misesta saatava päästöjen säästöpotentiaali pääteiden liikenteelle on noin 300 milj. kg vuodessa. Laskelma kuvaa karkeuden potentiaalista suuruutta sillä oletuksella, että sama säästö saataisiin koko tarkastelussa olevalle verkolle.

Taulukko 11. Päästöjen pintakarkeudesta saatavan säästöpotentiaalin arviointia.

Ajoneuvoryhmä	(*) Kulutus (l/100 km)	Päästöt (*) CO ₂ eq. (g/km)	(**) Liikenne- suorite milj.ajonkm	Pintakarkeuden säästöpotentiaali			
				PA-kulutus (***)		CO ₂ eq.	CO ₂ eq.
				l/100 km	l/km	g/km	milj.kg
Henkilöautot	7.07	170	18755	0.26	0.003	6.3	118
Pakettiautot	8.82	237	1565	0.32	0.003	8.7	14
Linja-autot	23.05	623	302	0.92	0.009	24.9	8
Kuorma-autot ilman perävaunua	38.10	1025	553	1.91	0.019	51.2	28
Perävaunulliset kuorma-autot	45.07	1209	1539	2.70	0.027	72.5	112
Yhteensä			22713				279

(*) LIPASTO/VTT, (**) Tietokisteri 2008/Päätiet, (***) muut ajoneuvoryhmät ha-potentiaalin perusteella

Pöly

Uuden henkilöautonrenkaan kulutuspinna on 8-9 mm. Rengasmääräysten mukainen pienin sallittu kulutuspinna on 1.6 mm. Keskimääräinen uransyvyys renkaissa on noin 5 mm. Henkilöauton rengas kuluu noin yhden millin 7400 km ajossa. Rengaskerta ku-luu loppuun noin 50 000 km:n ajossa. Kesärenkaita uusitaan noin 1.1 milj.kpl ja talvi-renkaita noin 1.4 milj. kpl vuosittain. Kun yhdestä renkaasta poistuu kumia sen käyt-töaikana noin yksi kg, niin kesärenkaiden kuluma on noin 1.1 milj.kg vuodessa. Talvi-renkaita ei ajeta yleensä yhtä ”loppuun” ja niistä syntyvä rengaskuluma on vähäi-sempi. Kaiken kaikkiaan henkilöautojen rengaskulumisesta syntyvän rengaspölyn määrä lienee suuruusluokkaa 1.5 milj.kg/v. Tarkempia laskelmia ei tässä yhteydessä ollut käytettävissä. Sen rinnalla voidaan kuitenkin todeta, että rengaskulumisen mää-rä on huomattavasti pienempi kuin asfalttipäällysteen kulumisen määrä, joka on arvi-oista riippuen välillä 45-100 milj.kg vuodessa [8].

5.6 Tienpito

Päällysteiden karkeudella on vaikutuksia tienpidossa hoidon ja ylläpidon kautta. Pää-llysteiden karkeudet muodostuvat käytettyjen päällystetyyppien ja niissä käytettyjen materiaalien ominaisuuksien perusteella määräten pintakarkeuden alkutilanteen. Tämän lisäksi päällysteiden ikääntymisen aikana myös karkeudet muuttuvat. Alku-karkeuksiin vaikuttavat myös päällystystyössä tapahtuvat erilaiset työvirheet ja puut-teet.

Hoito

Päällysteen karkeuden ei arvioida vaikuttavan tien hoitotoimenpiteisiin. On kuitenkin olemassa sellainen mahdollisuus, että päällysteen pintakarkeudella on vaikutusta ve-den kulkeutumiseen ja kosteuden pysymiseen tien pinnalla ja siten välillinen vaikutus liukkauden torjunnan määrään. Suolan käyttö liukkauden torjunnassa nopeuttaa pääl-lysteiden kulumista ja sillä saattaa olla välillinen vaikutus myös karkeuden kehitty-miseen.

Liukkaudentorjunta. Päällysteen pinnan karkeudella voi olla talvihoitoa helpottavia tai hankaloittavia ominaisuuksia. Karkealla päällysteellä vaaditut talvikelin kitka-arvot saatetaan saavuttaa helpommin. Toisaalta karkeuden suunta voi vaikuttaa tähän, mutta siitä ei ole tarkempia tutkimustietoja käytettävissä.

Päällysteen pinnan karkeus vaikuttaa veden poistumiseen. Kun suolavesi jää karkealla päällysteellä pitempään sen rakoihin ja huokosiin niin suolauksen vaikutus kestää pidempään. Tällöin voidaan selvitä pienemmillä suolamäärillä.

Lumen auraus. Karkeuden merkitys lumen auraukseen on vähäinen. Lumen aurauksen kustannuksiin saattaa olla merkitystä sillä, että auraukskalusto kuluttaa huonon kitkan takia enemmän polttoainetta. Lumen aurautoimenpiteillä saatetaan tehdä päällysteen pintaan pituussuuntaisia uria, joiden linjat vaihtelevat aiheuttaen mittausvirhettä kaikkiin laser-antureilla tehtäviin tien pinnan mittauksiin.

Ylläpito

Päällysteen karkeus vaikuttaa ylläpidossa lähinnä kolmen eri kokonaisuuden kautta. Päällystetyyppien ja siinä käytettyjen kiviainesmateriaalien valinnalla on merkitystä päällysteen alkukarkeuteen. Samoin erilaiset työvirheet voivat näkyä uudella päällysteellä karkeusvaihteluina. Pitkäaaltainen karkeus, megakarkeus, kasvattaa raskaiden ajoneuvojen dynaamista tierasitusta ja kiihdyttää tien rappeutumista. Sillä on välillisesti ylläpidon kustannuksia lisäävä vaikutus.

Päällysteiden suunnittelua ja valmistusta on ohjannut pääasiassa kulutuskestävyys. Jos karkeus otettaisiin paremmin huomioon päällystesuunnittelussa, niin se lisäisi ylläpidon kustannuksia, koska materiaalivalintoihin ja päällystystyön tekemiseen jouduttaisiin kiinnittämään enemmän huomiota.

Päällystysmenetelmä vaikuttaa karkeuteen välillisesti. Eri menetelmien asettamat vaatimukset materiaaleille aiheuttavat erilaisia karkeuksia. Siten esim. valu-asfaltti tuottaa sileämpää päällystettä kuin pintaukset. Pintauksissa irtokiviaines sidotaan sideaineella vanhaan pintaan. Näin kiviaineksen raakoosta aiheutuu helposti lisäkarkeutta. Usein tilanne on myös tavoiteltu. SMA päällysteissä osa kiviaineksen rakeisuuskäyrän rakeista puuttuu, jolloin päällysteestä tulee avoimempaa ja siten karkeampaa. Valuasfaltti sisältää paljon bitumia ja lähes kaikki huokokset täyttyvät bitumilla. Lopputuloksena saadaan päällyste jonka karkeus on pieni. Päällystetyypit karkeimmasta hienoimpaan ovat järjestyksessä: Pintaukset, SMA, AB, PAB ja VA.

Megakarkeudella arvioidaan olevan vaikutusta päällysteiden ylläpidon kustannuksiin. Se vaikuttaa raskaan ajoneuvon tiehen aiheuttamaan dynaamiseen rasitukseen. Dynaamisen rasituksen kasvaessa tien rappeutuminen kasvaa ja siitä aiheutuu vaurioita ja lisää ylläpitokustannuksia [H2].

5.7 Vaikutusten yhteenveto

Pintakarkeuden eri komponenttien pelkistetty vaikutusyhteenveto on esitetty seuraavassa kuvassa. Positiiviset vaikutukset on esitetty vihreällä taustavärillä ja negatiiviset vaikutukset punaisella. Karkeasti voidaan todeta, että yli 10 mm:n aallonpituuden epätasaisuuksia kannattaa minimoida ja alle 10 mm:n aallonpituuden epätasaisuutta kannattaa nostaa. Lyhytaaltainen epätasaisuus parantaa renkaan ja tien välistä kitkaa

ja veden kulkeutumista pois ajourasta sekä vähentää korkeataajuisia rengasmelua. Pitkäaaltoiset epätasaisuudet lisäävät vierintävastusta ja melua sekä kuluttavat ajoneuvoa ja tuntuvat epämiellyttäviltä (Kuva 27).

Aallonpituus	0.001 mm 10 ⁻³	0.01 mm 10 ⁻²	0.1 mm 10 ⁻¹	1 mm 10 ⁰	10 mm 10 ¹	100 mm 10 ²	1 m 10 ³	10 m 10 ⁴	100 m 10 ⁵
Tunnusluku	iso	Mikrokarkeus (RMS)		Makrokarkeus (MPD/RMS)		Megakarkeus (RMS)	Epätasaisuus (IRI)		
	2003-2007			FineMacro (RMS)	Rough Macro (RMS)	Mini Mega (RMS)	Epätasaisuus		
	2008-2013			Makrokarkeus (RMS)		Megakarkeus (RMS)	Epätasaisuus		
	Ehdotus	Mikrokarkeus (RMS)		Hieno makrokarkeus (RMS)		Karkea Makrokarkeus (MPD/RMS)	Megakarkeus (RMS)	Epätasaisuus (IRI)	
Vaikutukset kitkaan	Adheesio			Hystereesi					
	Kitka					Kitka			
				Optiset ominaisuudet					
				Veden roiske & sumu					
Vaikutukset meun				Rengas/Tie- melu					
				Ulkopuolisen melun lähde		Sisämelun lähde			
Vaikutukset kustannuksiin	Rengaskuluminen					Ajoneuvon kuluminen			
						Vierintävastus			
						Dynaaminen pyöräsuoritus			
						Ajomukavuus			
						Tien ylläpito			
Tavoitteet	Tarpeellinen				Vältettävä				

Kuva 27. Yhteenveto pintakarkeuden vaikutuksista tien käyttäjiin ja tienpitoon. Karkeuden lisäämisellä on sekä positiivisia (vihreä) että negatiivisia (punainen) vaikutuksia.

Taulukkoon 11 on koottu yhteenvetoa päällysteen ominaisuuksien vaikutuksesta tienkäyttäjiin. Solujen värikoodit kertovat minkä suuntainen vaikutus kunkin sarakkeessa esitetyn tekijän kasvulla on riveillä esitettyihin vaikutusmuuttujiin. Punainen tarkoittaa kasvattavaa vaikutusta ja vihreä vähentävää vaikutusta. Joissakin soluissa on numeerinen arvo vaikutuksille. Kaikille vaikutuksille ei löydy välttämättä numeerisia arvoja, vaikka niiden vaikutuksen suunta onkin tiedossa.

Taulukko 12. Yhteenveto päällysteen ominaisuuksien vaikutuksista tien käyttäjiin ja tienpitoon. Vaikutusten suunta on selvillä kutakuinkin, mutta suuruus vain harvoissa tilanteista.

Päällysteen pintaominaisuuksien vaikutuspotentiaalia				Mikrokarkeus	Makrokarkeus			Mega-	Päällyste		
					Hieno (<10mm)	Karkea (>10 mm)	Suunta (%)	>50 mm	Jäykkyys	Huokoisuus	Max rae
			Alue	0.1-1 mm	0.3-2.5 mm		-50% - +80%	0.2-2 mm			4-32 mm
Turvallisuus	Kittika	Kuivakitta					Arvio				
		Märkäkitta			[J Yeaman]	SlipSpeed	Arvio	Arvio			
		Kitkan nopeusriippuvuus			[J Yeaman]						
		Vesiliirto			[J Yeaman]		Arvio				
		Lumi			?	?	?	?			
		Jää			?	?	?	?			
Ympäristö	Melu	Sisäinen			-3 dB (Kuva 25)	2 dB/mm (Uusi Seelanti)	3 dB	2 dB		3-4 dB	3 dB
		Ulkoinen			-3 dB (Kuva 25)	6 dB/mm	3 dB	7 dB/mm (Kuva 25)		3-4 dB	3 dB
	Kustannukset	Rengaskuluma		[48]	[48]		?	?			?
		Vierintävastus	0.8-2%	0.86%/mm Glaeser	2.5%/mm (Kuva 18)		?	15%/mm (Kuva 18)			
		PA-kulutus			3-5%/mm		?	3-5%/mm			
		Urakestävyys									
		Karkeuden pysyvyys					?				
		Ajoneuvon kuluminen				?		?			

6 Karkeustiedon käyttökokemukset

6.1 Suomi

Päällysteiden karkeustietoa on mitattu Suomessa ura- ja tasaisuusmittausten yhteydessä, mutta sitä ei ole vielä toistaiseksi käytetty. Mittauksiin ovat sisältyneet vain makro- ja megakarkeus, mutta hiukan normeista poikkeavin määrityksin. Makrokarkeus on yleensä yhdistetty päällysteen kitkaan, mutta sillä ei ole ajateltu korvattavan kitkan mittauksia. Makrokarkeuden tiedetään kansainvälisten tutkimusten perusteella selittävän kitkan nopeusriippuvuutta. CEN-standardissa on yritetty tehdä määrittelyä kansainväliseksi kitkaindeksiksi, jota selittäisi makrokarkeuden MPD-arvo, mutta sellaista ei ole kuitenkaan saatu kehitettyä. Suomessa on ajoittain oltu kiinnostuneita päällysteiden karkeuksista nimenomaan kitkan kannalta (esim. VT3 keskisaumajuotokset). Karkeusmittauksilla voitaisiin yrittää saada tuntumaa päällysteiden bitumin pintaan nousuun ja siitä mahdollisesti aiheutuvaan kitkan alenemiseen. Liikenneonnettomuuksien tutkijalautakunnat voisivat määrätä tietyissä tilanteissa karkeusmittauksia, mikä saattaisi tuoda lisää tietoa onnettomuuskohtien kitkaolosuhteista. Sellaiset kohdat kuten paikkaukset tai ajoratamerkinnot ovat yleensä liukkaita ja niiden karkeuksia kannattaisi mitata. Megakarkeutta on yritetty sisällyttää Asfaltinormeihin, mutta se ei ole lopulta toteutunut [H1].

Karkeusmittaukset ovat rajoittuneet pääasiassa makro- ja megakarkeuden mittaamiseen, mutta nykyisellä tekniikalla myös mikrokarakuden mittaaminen alkaa olla mahdollista. Mikro- ja makrokarkeudet ovat merkityksellisiä kitkan kannalta ja makrokarkeus melun kannalta. Megakarkeus vaikuttaa ajoneuvoon kuluttaen renkaita, akselistöä ja niveliä. Megakarkeus lisää raskaiden ajoneuvojen dynaamista tierasitusta ja olisi sen takia otettava yleisempään käyttöön. Megakarkeusprofiilista on jo nyt laskettavissa dynaaminen rasisusindeksi (DRI). Päällysteen pinnan pituussuuntaisen epätasaisuuden hallinnassa voitaisiin siirtyä koko aallonpituusalueen kattavaan PSD:n (power spectral density) käyttöön. Autonvalmistajat käyttävät tätä tapaa simuloideaan ajoneuvon ja tien välistä vuorovaikutusta [H2].

Ylläpitourakoiden toimivuusvaatimukset

Pitkäkestoisissa ylläpitourakoissa on sisällytettynä megakarkeus yhdeksi kuntoa kuvaavaksi tunnusluvuksi ja sille on asetettu raja-arvo, 0.9 mm, jonka ylittämisestä seuraa arvonmuutoksia. Karkeusmuuttujien käytöstä kannattaa hakea käytännön kokemuksia ja kehittää tunnuslukujen vaatimuksia sen pohjalta [35].

Päällysteiden ohjelmointi

Päällysteiden ohjelmoinnissa karkeustietoja ei ole toistaiseksi käytetty toimenpiteiden ajoituksen tai tyyppin perusteena.

6.2 Lähialueet

Ruotsi

Ruotsissa mitataan karkeuksia kuten Suomessakin ura- ja tasaisuusmittausten yhteydessä koko tieverkolta. Raportointiväleinä käytetään 20 m. Lisäksi tien pituusprofiilidata (PTM-laitteen anturit 5, 9 ja 13, raakadata 100 mm) talletetaan tietovarastoihin. Karkeusmuuttujina ovat olleet hieno ja karkea makrokarkeus sekä megakarkeus. Karkeudet on laskettu RMS-muuttujina vuoteen 2005 asti ja ne on mitattu molemmista ajourista sekä niiden välistä. Makrokarkeus on jaettu kahteen eri aallonpituusalueeseen (1-10 mm ja 10-100 mm). Megakarkeuden aallonpituusalue on 100-500 mm. Vuodesta 2005 lähtien on alettu mitata myös makrokarkeuden MPD-tunnuslukua.

Vanhojen mittausten RMS-tunnuslukuja ei ole ehditty kovin laajasti käyttää. Karkeustiedon hyödyntämisessä ollaan suuntautumassa enemmän MPD-tunnusluvun käyttöön. Syynä on, että se on standardin mukainen ja sen avulla tutkimustieto on paremmin hyödynnettävissä. Toisaalta myös MPD-tunnusluvun kohdalla nähdään tarpeelliseksi aallonpituusalueen kahtia jakaminen 10 mm:n kohdalta.

Karkeustiedon hyödyntäminen on tällä hetkellä vielä tutkimusvaiheessa. Ruotsi onkin mukana tutkimusohjelmassa, missä selvitetään karkeuden ja kitkan, melun ja vierintävastuksen välisiä yhteyksiä. Yhdessä tutkimuksessa käytetään karkeustietoa päällysteen homogeenisuuden arvioinnissa. Lisäksi alkanee tutkimus, missä on tavoitteena tehdä lyhytaikaisia malleja karkeuden kehittymisestä. Megakarkeuden käyttö on suoraviivaisempaa, koska sillä on vain negatiivisia vaikutuksia. Makrokarkeuden käyttö on monitahoista, koska sillä on erisuuntaisia vaikutuksia. Tästä syystä nähdään, että sen aallonpituusalue tulee jakaa kahtia. Mikrokarkeustieto olisi tarpeellinen, mutta sen nopea mittaaminen ei ole toistaiseksi mahdollista. [H5].

Eesti

Eestissä ei mitata pintakarkeuksia. Kitkanmittauksia tehdään RoAR Mark II –laitteella ja sen tuloksista tuotetaan mm. IFI-kitkaindeksi (International Friction Index). Kitka saattaa olla tekemisissä mikro- tai makrokarkeuden kanssa.

Kitkaa mitataan pääosin uusilta päällysteiltä osana hyväksymistoimenpiteitä. Ideaalitalanteissa uudelleenpäällystettyjen teiden alennettuja nopeusrajoituksia ei poisteta ennen kuin kitka (tai karkeus) on varmistettu.

Karkeusmuuttujia ei ole sisällytetty PMS-järjestelmiin. Karkeudella on vaikutusta tienkäyttäjien lähinnä turvallisuuden kautta. Karkeudella ei liene vaikutusta ajoneuvokustannuksiin muutoin kuin rengaskulumisen kautta. Tienkäyttäjät tuskin huomaavat päällysteiden pinnan karkeuseroja [H3].

Tanska

Tanskassa mitataan makrokarkeutta MPD-arvona profilografilla. Mittaukset tehdään yleisillä teillä. Karkeustietoa käytetään alhaisten kitkatasojen tunnistamisessa. Nämä tienkohdat (noin 10 %) mitataan sitten erikseen kitkamittarilla.

Karkeuteen liittyvät raja-arvot on esitetty seuraavassa taulukossa ja tarkemmin läheteessä [19]. Karkeuden jakaumien perusteella valitaan kohteet, joilla tarvitaan erilli-

nen kitkan mittaust. Kitkamittaus on tarpeen jos makrokarkeuden raja-arvon 0.20 alittaa vähintään 20 % havainnoista tai raja-arvon 0.25 alittaa vähintään 25 % tai raja-arvon 0.30 alittaa vähintään 50% (Taulukko 13).

Taulukko 13. Kitkanmittauksiin valittavien kohteiden kriteerit MPD:n perusteella[19].

	MPD-tal < 0.20 [mm]	MPD-tal < 0.25 [mm]	MPD-tal < 0.30 [mm]
Længde kriterium	>= 20 %	>= 25 %	>= 50 %

Tabel 5. kriterium for udvælgelse af strækninger til friktionsmåling.

Karkeus vaikuttaa jarrutusmatkojen pituuteen. Makro- ja mikrokarkeus vaikuttavat molemmat niihin. Karkeus vaikuttaa myös vierintävastukseen ja sitä kautta polttoaineen kulutukseen [H5].

Englanti

Englannissa tehdään päätieverkolla karkeusmittauksia ja niitä käytetään mm. kitkaolosuhteiden arviointiin. Tunnuslukuna käytetään tällöin makrokarkeuden MPD-arvoa. Sen lisäksi Englannissa on kehitetty menetelmä tuottaa karkeustiedosta päällysteen purkautuneisuutta kuvaavia tunnuslukuja. Mittaukset tehdään mittauslaitteella, jossa on 25 kpl 16 kHz laseranturia. Karkeustietoa tuotetaan kaikilla antureilla siten, että ensin tuotetaan ns. pseudokarkeus 6 mm:n välein. Tämän jälkeen siitä suodatetaan aallonpituusalue 2.5-100 mm mukaan ja siitä lasketaan karkeuden RMS-arvoja sekä paikallisesti (10 m) että pitemmille jaksoille (100 m). Näiden erotuksista muodostetaan jakaumat ja jakaumien eroja tarkastelemalla päätellään milloin päällyste sisältää purkautuneita kohtia. Menettelyn hankaluutena on, että se on kalibroitava kullekin päällystetyypille erikseen. Toistaiseksi se toimii vain yhdellä päällystetyypillä (HRA, Hot Rolled Asphalt). Hyväkuntoisilla päällysteillä jakaumissa ei ole kovin suurta eroa, mutta purkautuneilla päällysteillä yleisjakauma (100 m) ja paikalliset jakaumat (10 m) poikkeavat paljon. Käytettäviä tunnuslukuja ovat mm. korrelaatio, karkeussuhde, paikallinen erotus. Toistaiseksi tulokset ovat olleet lupaavia. Vaikeutena on, että tunnusluvun tulkinta pitää kalibroida kullekin päällystetyypille erikseen [34].

Päättäneitä ja käynnissä olevia tutkimusohjelmia

Päällysteiden vierintävastuksiin, meluun ja kitkaan liittyviä tutkimusohjelmia on ollut käynnissä useita, joista on lista oheisessa taulukossa. EU:n alueella on menossa jatkuvasti tutkimustoimintaa, missä pyritään tekemään tutkimuksia ja selvityksiä yli kansallisten rajojen ja tuottamaan ja jakamaan tuloksia kaikkien halukkaiden käyttöön. Ilmastomuutos ja ympäristönäkökohdat ovat ne suuret taustavaikuttajat, joiden suhteen halutaan kehittää entistä parempaa infrastruktuuria.

Käynnissä olevia tutkimusohjelmia ovat mm. TYROSAFE, ECRPD- ja NordFou-projektit, joista tulee tähän aihepiiriin liittyviä tutkimustuloksia ja niitä kannattaa jatkossakin seurata (Taulukko 14).

Taulukko 14. Päättäneitä tai käynnissä olevia meluun, kitkaan tai vierintävastukseen liittyviä tutkimusohjelmia.

Tutkimusohjelma	Aika	Tavoite/tutkimusalue	Tuloksia - raportteja
NOTRA	1999-2002	Melun mittaus	
HARMONOISE	2001-2005	Tie- ja rautateliikenteen melun ennustemallien kehittäminen.	D4 - Final Technical Report. State of The Art. Vehicle categories. Modelling and Harmonise D7 - D8 - D9 -
HILJA	2002-2005	Hiljaiset päällysteet	Hiljaiset päällysteet - tuotevaatimukset ja mittarit
SILVIA - Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control	2002-2005	Vähämeluisten tiepäällysteiden kehittäminen	Saataavissa monipuolinen raportti- ja esittelyaineisto
IMAGINE	2003-2006	Edistää melunlaskentamallien käyttöönottoa Euroopan maissa. (Tieliikenne, rautateliikenne, lentoliikenne, teollisuusmelu)	D3 - Assessment Programme for parameters of the "general" European vehicle fleet - IMA52TR-060111-MP10. D11 - The Noise Emission Model for European Road Traffic. Description of the delivery of D11 road vehicle emission.
VIEME	2006-2007	Rengasmelun vähentäminen	VIEME - Loppuraportti
TYROSAFE	2008-2011	Vierintävastus - kitka - melu	WP3 - D10, WP1 - D6
ECPRD	2007-2010	Vierintävastuksen mallintaminen	D5 - Road surface effects on rolling resistance - coastdown measurements with uncertainty analysis in focus
NordFoU	2009-2011	Tien pintakarkeus - melu ja vierintävastus	Ei julkaistuja tuloksia toistaiseksi

7 Karkeuden hallinta

7.1 Päälysteiden karkeustieto

Päälysteiden pintakarkeuksia hallitaan ylläpidossa niillä karkeustiedoilla, jotka ovat mitattavissa nopeasti. Karkeusmuuttujat johdetaan karkeuden ja tienkäyttäjien välisen syys-seuraussuhteiden ja vaikutuspotentiaalien perusteella. Pääasialliset vaikutukset liittyvät liikennemeluun, vierintävastuksen kautta polttoaineen kulutukseen ja kitkan kautta turvallisuuteen. Nykyisiin muuttujiin ja niiden mittausperiaatteisiin suositellaan tehtäväksi muutamia muutoksia. Tärkeimmät perusteet karkeuksien hallintaan tulevat melusta ja polttoaineen kulutuksesta.

Päälysteiden pintakarkeuksien hallinta suositellaan tehtäväksi eri aallonpituusalueilta mitattujen tunnuslukujen avulla. Aluksi karkeuden hallintaa suositellaan kehitettäväksi määrittämällä uusia tunnuslukuja tai modifioimalla entisiä. Tunnusluvut on esitetty Taulukossa 15.

Taulukko 15. Karkeuden hallinnan tunnusluvut.

Tunnusluku (ja sen aallonpituusalue)	RMS-tunnusluku	MPD-tunnusluku	Suunta
- hieno makrokarkeus (0.5-10 mm)	x	(x)	(x)
- karkea makrokarkeus (10-50 mm)	x	x	x
- megakarkeus (50-500 mm)	x	-	-

Tärkein tunnuslukuihin liittyvä uudistus on se, että niiden laskennassa huomioidaan aiempaa paremmin taustalla vaikuttavat mekanismit. Makrokarkeuden ISO-normin mukaiselle aallonpituusalueen sisällä on merkittävä rengasmeluun liittyvä raja-arvo, 10 mm, joka jakaa sen vaikutukset meluun kahdensuuntaisiksi. Raja-arvoa pienemmillä aallonpituuksilla pinnan karkeuden suuret amplitudit ovat suotavia ja suuremilla aallonpituuksilla taas ei. Tästä syystä se suositellaan mitattavaksi kahtena eri tunnuslukuna (samaa tapaamaan kuin aiemmin on tehty). Hienoa makrokarkeutta tarkastelemalla päästään hallitsemaan päälysteen positiivisia meluominaisuuksia. Vastaavasti karkeampaa makrokarkeutta tarkastelemalla päästään hallitsemaan päälysteen negatiivisia meluominaisuuksia ja vierintävastuslisää.

Karkeuden vaikutusten hallinnassa ei kuitenkaan riitä pelkkä karkeusarvojen tarkastelu vaan tarvitaan tunnusluku, joilla pystytään kuvaamaan karkeuden hyödyllisyyttä tai haitallisuutta. Makrokarkeuden tunnusluvut suositellaan tuotettaviksi sekä RMS- että MPD-arvoina. Erilaiset päälysteen profiilit tuottavat erilaisia MPD- ja RMS-arvoja, joiden eroista voidaan päätellä karkeuden hyödyllisyyttä tai haitallisuutta. Uusilla tai melua vaimentavilla päälysteillä RMS on hallitsevampi ja kuluneilla tai meluisilla päälysteillä MPD on hallitsevampi. Näiden avulla suositellaan tuotettavaksi uusi tunnusluku, jolla kuvataan karkeuden suuntaa. Karkeuden suunnalla arvioidaan olevan vaikutuksia paitsi meluominaisuuksiin myös päälysteen kitka- ja vierintävastusominaisuuksiin. Karkeuden suuntaa ja tasoa jouduttaneen käsittelemään samanaikaisesti.

Megakarkeutta tarkastellaan tunnuslukuna sellaisenaan. Tunnusluvun mittaustarkkuutta suositellaan kuitenkin parannettavaksi. Tämä esitellään tarkemmin käyttöön-oton ohjeistuksessa.

Makro- ja megakarkeustietoa kannattaa mitata säännöllisesti. Mikrokarkeustiedon mittaamista tietyissä valikoiduissa kohteissa kannattaa selvittää. Karkeustiedon mittaamiseen ja käyttöön liittyvät tarkemmat määrittelyt on esitetty kappaleessa 8.

Karkeustiedon käyttöönotto edellyttää jatkokehittämistä. Akuutein kehittämisen alue on makrokarkeuden alueella, missä joudutaan ensin muuttamaan mittauskäytäntöjä ja tunnuslukuja. Sen jälkeen joudutaan tekemään jatkotutkimuksia siitä, miten makrokarkeutta voidaan hallita uusilla tunnusluvuilla. Jatkokehittämisen painopiste tulisi olla uudet tunnusluvut vs. suomalaiset olosuhteet. Karkeustiedon hallinta edellyttää parempaa tietoa sen syy-seuraussuhteista ja siksi kannattaa tehdä lisäselvityksiä karkeuden tilasta, kehittymisestä ja vaikutuksista sekä päällystystekniikan vaikutuksesta karkeuksiin. Jatkotutkimusehdotuksia on listattu kappaleessa 9.

7.2 Karkeuteen vaikuttaminen

Päällysteiden karkeuksiin tulee vaikuttaa kolmella eri tavalla.

- Uusien päällysteiden suunnitteluun tulisi ottaa urakulumisen lisäksi vahvemmin myös muita näkökulmia (melu, kitka ja vierintävastus). Nämä tuottaisivat päällystesuunnitteluun tavoitteita myös karkeudelle. Haitallista karkeutta tulisi välttää ja hyödyllistä karkeutta suosia. Uusien päällysteiden karkeus määräytyisi siten hallitummin.
- Karkeusvaihteluita aiheuttavat työ- ja materiaalivirheet tulisi tunnistaa paremmin ja päällystystekniikoita tulisi kehittää siten, että virheet vähenisivät.
- Hyödyllisen karkeuden pysyvyyteen tulisi kiinnittää huomiota. Tällä hetkellä uuden päällysteen hyödylliset karkeusominaisuudet heikkenevät merkittävästi jo ensimmäisen talven aikana. Hyödyllisten ominaisuuksien pysyminen pitempään toisi jo merkittävän hyödyn.

Melun kannalta tavoiteltavia karkeusominaisuuksia

Melun kannalta tulisi välttää renkaan ja tienpinnan välille syntyviä adheesiosidoksia. Renkaan ja tien pinnan tulisi olla hydrofiilisiä. Tämä vähentää korkeataajuista melua. Päällysteen pinnan kiillottumista tulisi välttää ja valita kiillottumista ehkäiseviä materiaaleja. Kiillottuminen lisää adheesioita ja siten korkeataajuista melua. Samoin kuivoimattomat (sliksirenkaat) renkaat lisäävät korkeataajuista melua [6].

Makrokarkeuden amplitudien tulisi olla lyhyillä aallonpituuksilla (0.5 – 10 mm) korkeita, kun taas 10 – 50 mm aallonpituuksien amplitudien tulisi olla pieniä. Käytännössä tämä tarkoittaa, että raekoon tulisi olla pieni eli 4 – 6 mm. Erityisesti tulisi välttää yli 10 mm raekokoja. Jos päätös on tehtävä maksimiraekoon ja maksimiampitudin välillä, kannattaa suosia maksimiraekoon rajoittamista. Rakeiden muodolla on myös merkitystä, eli kiviaineksen valinnassa kannattaa suosia kulmikkaita raemuotoja silotuneiden sijaan. Kiviaineksen raekokojakaumassa kannattaa suosia mahdollisimman avointa materiaalia. SMA8 tai pienempi on käytännössä toimiva esimerkki melun kannalta hyvistä päällysteistä.

Yleissääntönä voidaan todeta, että makrokarkeus on melun kannalta epäedullista ja sitä tulisi minimoida. Raekoko kannattaa pitää vakiona ja päällysteen pinta yhtenäisenä. Aukot ja epäjatkavuudet lisäävät makrokarkeutta.

Jos kiviaines on muodoltaan liuskeista, tulee huolehtia erityisen hyvin pinnan tiivistämisestä (verrattuna siihen jos käytetään kubisoitua materiaalia).

Jos päällysteen pinta on erittäin huokoinen, niin silloin melun kannalta kannattaa minimoida kaikkea karkeutta, myös lyhytaaltoista makrokarkeutta.

Yleisenä ohjesääntönä voidaan pitää, että alle 10 mm aallonpituuksia kannattaa suosia ja kaikkia yli 10 mm aallonpituuksia kannattaa pyrkiä vähentämään. Makrokarkeudesta kannattaa tehdä negatiivisesti suuntautunutta.

Jo nyt on kokemuksia siitä, että pystytään tekemään päällysteitä, jotka ovat hiljaisempia, omaavat hyvän kitkan ja kestävät paremmin kuin referenssipäällyste. Todennäköisesti näillä on myös alhaisempi vierintävastus (mitä ei ole kuitenkaan mittauksilla todettu). Melua vaimentavien päällysteiden kehittämisessä on havaittu mm. seuraavia asioita [47]:

- melutaso noin 3 dB vertailupäällysteitä alhaisempi (nastarenkailla erot pieniä)
- alhaisempi melutaso säilyy jopa 5 v
- pölytasot vertailupäällysteitä alhaisempia
- kiviaineisten geologiset ominaisuudet korostuvat
- jopa parempi kulutuskestävyys kuin vertailupäällysteellä
- parempi kitka kuin vertailupäällysteellä

Melun kannalta edullisen päällysteen suunnittelussa on tarkoin harkittava mihin kohteisiin se sopii ja huomioitava samalla kulumiskestävyys. Negatiivista karkeutta hallitsemalla on mahdollista päästä päällysteisiin, joissa melu, kitka ja vierintävastus ovat kaikki parempia. Karkeusominaisuuksien parantaminen ja kulumiskestävyyden säilyttäminen tuovat päällystesuunnittelulle haasteita.

Karkeuteen vaikuttavat työvirheet

Päällystystyön virheillä on vaikutusta karkeuteen. Seuraavat työvirheet lisäävät karkeuden vaihtelua:

- lajittuminen
- massan jäähtyminen kuljetuksen aikana
- tuotantokatkokset – levitin pysähtyy/pysähtelee
- päällystystyön aikaiset lämpötilaerot
- jyräyksen epätasaisuus
- suhteutusvirhe
- kiviaineksen raekokopoikkeamat
- bitumin laatuvirheet

Lajittuminen voi aiheutua useista eri syistä. Yksi merkittävä riskitekijä, nykyisin jo pitkälti korjattu, on massan kuljetuslavan muoto. Nykyiset kuppilavat pienentävät lajittumisongelmaa massan siirrosta kuljetusautosta levittimeen.

Massan jäähtymisongelmaa voidaan yrittää ratkaista logistisilla keinoilla. Kuljetusmatkat ja liikennerruuhkat on pyrittävä huomioimaan kun suunnitellaan kohteille kul-

jetuksia. Myös koneaseman kapasiteetti on suhteutettava tuotantorytmiin. Ratkaisumallit löytyvät työsuunnittelusta ja logistiikan perusmenetelmistä. Tilauskäytännöissä kannattaa selvittää eri toimittajien käytännöt.

Levittimen pysähtely aiheuttaa pysähdyspaikkoihin paikallisia lajittumia ja siten paikallisia karkeuskohtia. Riskiä pienennetään samoilla menetelmillä kuin massan jäähtymisongelmaa. Jyräyksen määrän tulee olla riittävä ja sen tulee jakaantua tasaisesti.

Suhteutusvirhe aiheuttaa toteutuessaan koko tuotantoerän karkeusongelman. Suhteutusvirheen tuloksena voi syntyä joko liian karkeaa tai liian sileää päällystettä. Jos massan tuotannossa käytetyn kiviaineksen laatu vaihtelee, saattaa tuloksena olla liian karkeata massaa. Tuotannon aikana seurataan valmistuksessa käytettävää kiviainesta, mutta toleranssien ääriarajoilla toimittaessa voi lopputuotteeseen päätyä liian karkeata massaa.

Bitumin laatuvirheet voivat aiheuttaa sen, että sideaine kuluu liian nopeasti tai se ei kestä sään aiheuttamaa rasitusta. Kiviainesta ja tasoittavaa mastiksia irtoaa päällysteestä ja jäljelle jää karkea kiviaines ja epätasainen päällyste.

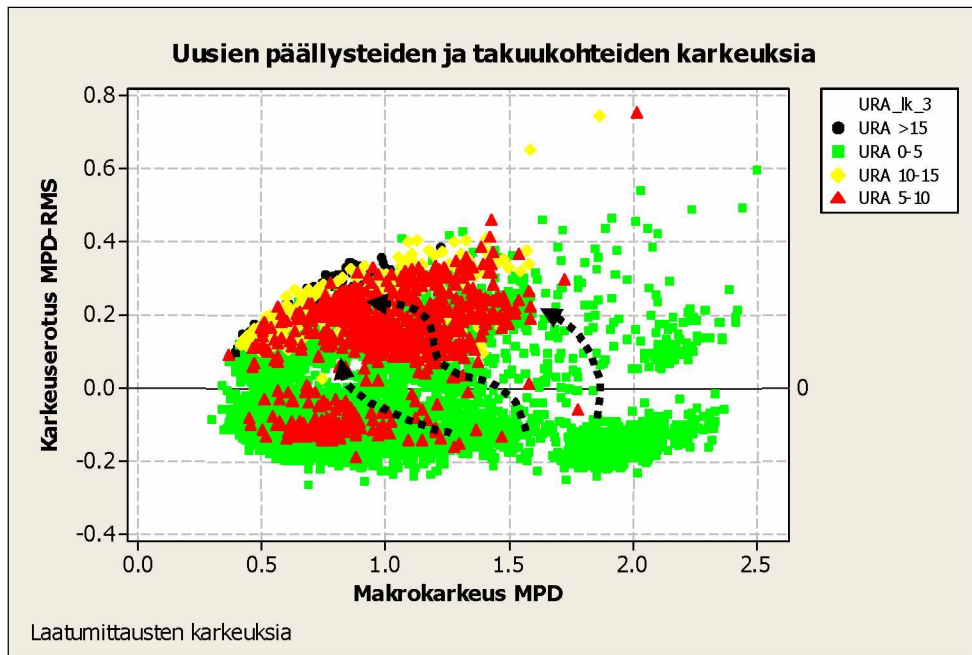
Suhteutusvirheet, liiallinen jyrääminen ja massan valmistusvirheet aiheuttavat liian sileitä päällysteitä. Suhteutuksessa on voitu mitoitaa ainessuhteet siten, että bitumilla ei ole riittävästi huokostilaa ja ylimääräinen bitumi nousee pintaan ja aiheuttaa paikallista liukkautta. Liiallinen jyräys saattaa tiivistää massan liian tiiviiksi ja bitumi nousee pintaan ja/tai huokostila jää liian pieneksi. Erityisesti SMA-massoilla valmistusprosessissa kuitu saattaa jäädä sekoittumatta (granuliittien rikkoutuminen voi olla vajavaista ja siinä olevat kuidut eivät pääse irti). Tämä aiheuttaa sen, että bitumi ei sitoudu kuituun vaan jää vapaaksi ja voi nousta pintaan.

Näihin työvirheisiin ja niistä johtuviin seurauksiin tulisi kiinnittää enemmän huomiota ja niitä tulisi pyrkiä vähentämään.

Hyödyllisen karkeuden pysyminen

Hyödyllistä karkeutta tulisi alkaa seurata ja lisäksi tulisi selvittää, mitkä päällysteen ominaisuudet parantavat sen pysyvyyttä. Haitalliselle karkeudelle tulisi asettaa raja-arvoja, joiden kautta karkeus vaikuttaisi toimenpiteiden ajoitukseen. Raja-arvojen asettamisessa tulee huomioida erilaiset tilanteet kuten liikennemäärät, taajamaolosuhteet jne. Tässä vaiheessa raja-arvoja voidaan asettaa megakarkeudelle. Ennen raja-arvojen asettamista makrokarkeuden MPD-arvolle tarvitaan jatkotutkimuksia.

Karkeuden eri tunnuslukujen kehittymistä kannattaisi seurata vuoden sisällä tiheämmin, jotta syntyisi käsitys miten se muuttuu. Karkeusmittauksia kannattaa kohdistaa myös muutaman vuoden ikäisiin ja vanhempiin päällysteisiin, jotta saataisiin käsitys siitä, minkä tyyppistä karkeus on kun se näyttää RMS-arvoiltaan olevan matalaa, mutta silti melun tai tärinän kannalta huonoa. Tällöin seuranta kohdistuu makrokarkeuden MPD:n ja RMS:n erotukseen (Kuva 28).



Kuva 28. *Urautuvien päällysteiden karkeuden suunta muuttuu negatiivisesta positiiviseen päin. Päällysteiden ikä on tunnistettavissa uraluokan avulla. Uusien päällysteiden (uraluokka 0-5 mm) karkeuserotus voi olla positiivinen tai negatiivinen, mutta vanhojen päällysteiden karkeuserotus on pääasiassa positiivinen. Mekanismin tunnistamiseksi tarvittaisiin uusien tunnuslukujen mittauksia (sekä RMS että MPD).*

7.3 Kuntoluokitus

Karkeuksien liittäminen kuntotilan kuvaukseen kannattaa ottaa käyttöön siten, että alkuvaiheessa seurataan karkeuksien kuntotilaa erillään muusta kuntotilan kuvauksesta ja mahdollinen yhdistäminen tehdään vasta kokemusten perusteella.

Pintakarkeudet suositellaan jaettaviksi joko kolmeen tai viiteen luokkaan. Aluksi käytönotettava luokitus on suuntaa antava, koska tarkemman luokituksen tekemisessä tarvitaan enemmän käytännön kokemusta. Luokituksessa on mukana uusia tekijöitä, joten esim. nopeusrajoitusriippuvuutta ei kannata tässä vaiheessa määritellä.

Hieno makrokarkeus

Hienon makrokarkeuden luokitus voidaan perustaa toistaiseksi lähteessä [2] esitettyyn kolmiportaiseen luokitukseen, jota voidaan täydentää viisiportaiseksi lisäämällä kummankin raja-arvon ulkopuolelle yhdet raja-arvot lisää. Alustavat raja-arvot ovat 0.10 ja 0.15 mm, jotka perustuvat vuosien 2003-2004 mittauksiin. Tämän työn yhteydessä ei ole erityisemmin tutkittu tämän tunnusluvun muita luokitusmahdollisuuksia.

Tunnusluvun tulkinta on sikäli suoraviivainen, että suuret arvot ovat tavoiteltavia ja pienet eivät.

Megakarkeus

Megakarkeuden osalta suositellaan, että kuntoluokituksen raja-arvot muodostetaan lähteessä [2] esitetyllä tavalla ottaen perustaviksi raja-arvoiksi kolmiportaisen luoki-

tuksen raja-arvot 0.40 ja 0.80 mm. Jos halutaan käyttää viisiportaista luokitusta, niin sitten määritetään molemmille puolille yhdet raja-arvot lisää (0.30, 0.40, 0.80 ja 1.00 mm).

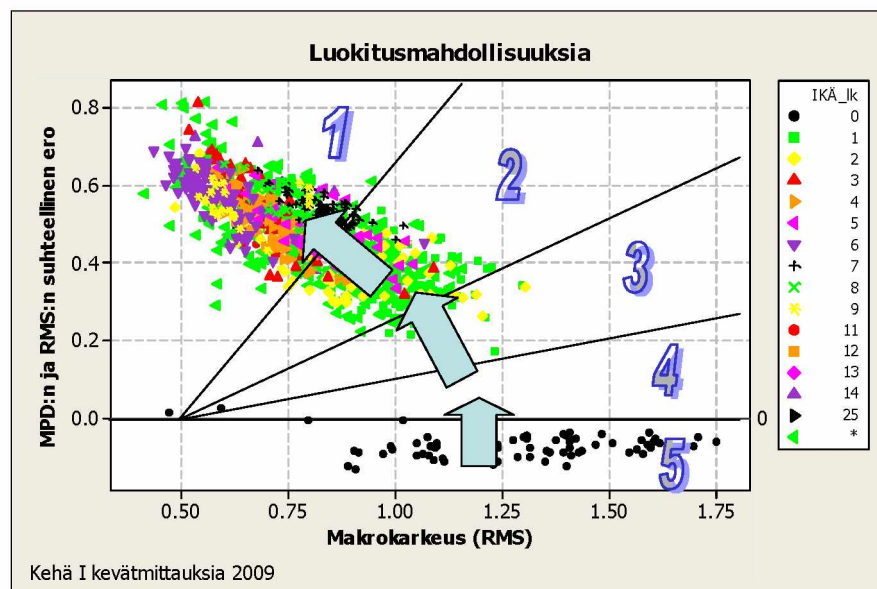
Tämänkin tunnusluvun tulkinta on suoraviivainen, koska pienet arvot ovat tavoiteltavia ja suuret vältettäviä.

Karkea makrokarkeus

Karkean makrokarkeuden suhteen suositellaan, ettei luokitusta tässä vaiheessa tehdä, koska sen hallinta edellyttää uuden tunnusluvun käyttöönottoa. Luokitukselle on perusteita vasta sitten kun on saatu päällysteiden mittauksiin perustuvat karkeusjakaumat. Karkean makrokarkeuden osalta huomio kohdistuu MPD:n tai RMS:n arvojen sijasta niiden avulla laskettavaan karkeuden suuntaan/erotukseen, joka tuottaa tietoa päällysteen hyödyllisten ominaisuuksien olemassaolosta. Suuntamuuttuja on niin uusi tunnusluku, että sen tarkempi luokittelu edellyttää enemmän mittaustietoa. Kuvassa 29 on viidestä eri periaatteesta tässä vaiheessa parhaimmalta näyttävä luokitusvaihtoehto. Sen toimivuutta tulisi kuitenkin tutkia enemmän laajemmalla mittausaineistolla. Sen etuna on mm., että:

- sillä pystytään helposti kattamaan tunnusluvun koko arvoalue
- se toimii sekä vanhoille että uusille päällysteille
- sen luokkarajat noudattavat päällysteen huonouden kehitymissuuntaa ja sen käyttö tukee vuosikehityksen hallintaa

Muita luokitustapoja on esitetty liitteessä 7.



Kuva 29.

Ehdotus makrokarkeuden luokitusperiaatteeksi, joka täyttää samanaikaisesti usean eri kriteerin. Taustalla on vain Kehä I:llä tehtyjä mitaustuloksia. Vaaka-akselilla makrokarkeus (RMS) ja pystyakselilla MPD:n ja RMS:n suhteellinen erotus. Periaate tulisi tutkia erilaisilla päällysteillä ajopaneelilla.

7.4 Raja-arvot

Pintakarkeuksiin liittyvät raja-arvot toimenpiteiden kohdentamista varten voidaan ottaa kuntoluokitusten pohjalta kuntoluokkien 1-2 alueelta. Megakarkeuden raja-arvo voidaan valita esim. väliltä 0.8-1.0 mm. Hienon makrokarkeuden osalta ei tarvita toimenpiteiden kohdentamiseen liittyviä raja-arvoja, vaan sen käyttö kannattaa kohdistaa tässä vaiheessa kuntotilan seurantaan. Tällä tunnusluvulla seurataan päällysteen kapasiteettia ”imeä” rengasmelua (ilman pumppautuminen).

Karkean makrokarkeuden osalta tiedetään tässä vaiheessa, että positiivisista karkeuden suunnasta kannattaa pyrkiä kohti negatiivista suuntaa ja karkeuden korkeita MPD-arvoja tulisi välttää. Oikeammin sanottuna negatiivinen karkeus kannattaisi saada pysymään mahdollisimman kauan ennen kuin se muuttuu positiiviseksi. Raja-arvoja suomalaisille päällysteille on tässä vaiheessa hankala määrittää, koska mitattua tietoa ei ole käytettävissä. Jos edellisessä kappaleessa esitetty luokitus toimii, niin toimenpiderajat voidaan ottaa kuntoluokkien 1-2 alueelta ja rajoittaa siten liian positiiviseksi muuttunutta karkeutta.

8 Käyttönoton ohjeistus

8.1 Tunnusluvut

Päällysteiden pintakarkeuksien hallinnassa päähuomio kannattaa kohdistaa ajourista mitattaviin karkeusmuuttujiin. Tällöin mitataan sekä oikean että vasemman ajouran pintakarkeudet. Ajourien välisen keskialueen karkeuden mittaaminen tuo lisätietoa karkeuden kehittämisestä, koska liikenne ei kuluta sitä osaa tiestä kovin merkittävästi ja sitä voidaan verrata ajourista mitattuun tietoon.

Käyttönotettavat tunnusluvut ovat taulukon 16 mukaiset. Ne tuotetaan sekä ajourista että ajourien välistä. Tien käyttäjävaikutuksia lasketaan vain ajourista tuotetuista tunnusluvuista. Ajourien välistä tuotettu tunnusluku tuottaa lisätietoa karkeuden kehittämisestä.

Mikrokarkeus on hyödyllinen tunnusluku sellaisenaan ja sen käyttöä voitaisiin edistää tekemällä pistekohtaisia mittauksia niissä kohdissa, joissa se on kitkaolosuhteiden takia tarpeellista kuten liittymät tai suojateiden kohdat.

8.2 Mittaaminen

Karkeustieto mitataan ura- ja tasaisuusmittausten yhteydessä. Mittausten raportointiväli on 10 m ja 100 m. Makro- ja megakarkeus mitataan ISO-normin mukaisesti (suodatus, laskenta). Makrokarkeuden tunnusluvut jaetaan kahtia aallonpituusrajan 10 mm avulla.

Megakarkeus mitataan kummastakin ajourasta käyttäen informaatiota koko uran leveydeltä. Mittaus suoritetaan siten viidellä eri anturilla noin puolen metrin leveydeltä. Kummankin ajouran tunnusluku tuotetaan siten viiden erillisen linjan keskiarvona. Tällöin mittauksen kohdistuvuus ja mittaustarkkuus paranevat. Tiedon tilaaja saa todennukaisemman ja tarkemman kuvan ajourien karkeudesta. Kummankin ajouran megakarkeus kannattaa tallettaa omina tietolajeinaan tietovarastoihin, mutta kannattaa harkita, josko käytettävä tunnusluku olisi oikean ja vasemman ajouran tunnuslukujen keskiarvo. Ajourien välistä mitattava megakarkeus tuotetaan vain yhdestä mitauslinjasta. Tunnuslukuja mitataan 11 (V:5+K:1+O:5), mutta talletettavia tunnuslukuja on vain kolme (1+1+1). Mittaustulokset talletetaan kolmella desimaalilla.

Karkean makrokarkeuden tunnusluvun mittaus voidaan myös tehdä koko ajouran leveydeltä, koska aallonpituuden alaraja, 10 mm, mahdollistaa mittauksen uralasereilla. Käytännössä karkea makrokarkeus mitataan samoilla antureilla kuin megakarkeus. Myös karkean makrokarkeuden todennukaisuus ja mittaustarkkuus paranevat. Mitattavia tunnuslukuja on 22 (5+1+5 +5+1+5), mutta talletettavia tunnuslukuja vain kuusi (RMS ja MPD urista ja keskeltä 1+1+1 ja 1+1+1). Lisäksi lasketaan MPD:n ja RMS:n erotus ja suhteellinen erotus. Mittaustulokset talletetaan kolmella desimaalilla.

Hieno makrokarkeus mitataan ajourista ja niiden välistä RMS-arvona. Uralaserin taajuus ei riitä tämän tunnusluvun mittaamiseen, vaan siihen tarvitaan ns. makrolaser.

Talletettavia tunnuslukuja on kolme (1+1+1). Mittaustulokset talletetaan kolmella desimaalilla.

Taulukko 16. Ehdotus karkeusmittausten muuttujiksi ja niiden laskentaperiaatteiksi.

Karkeusmittausten uudet tunnusluvut ja laskentaperiaatteet	Mittaussensori /taajuus #kHz	Aallonpituusalue (mm)	Mittauseriaate		Keskiarvoistus			Laskennalliset suuntamuuttujat	
			Normi	Laskenta	Raakadata	Asiakkaiden raportointiväli	Toimitettava tunnusluku	Erotus	Suhteellinen erotus
Hieno makrokarkeus RMS	Vasen ura	5/64	0.5-10	ISO 13473-2	RMS	100 mm	H_makro_V	H_makro_V	
	Urien väli	9/64	0.5-10	ISO 13473-2	RMS	100 mm	H_makro_K	H_makro_K	
	Oikea ura	13/64	0.5-10	ISO 13473-2	RMS	100 mm	H_makro_O	H_makro_O	
Karkea makrokarkeus RMS	Vasen ura	3/16	10-50	ISO 13473-2(*)	RMS	100 mm	K_apu_3	K_makro_V_RMS	MPD-RMS (MPD-RMS)/RMS
		4/16	10-50	ISO 13473-2(*)	RMS	100 mm	K_apu_4		
		5/64	10-50	ISO 13473-2(*)	RMS	100 mm	K_apu_5		
		6/16	10-50	ISO 13473-2(*)	RMS	100 mm	K_apu_6		
		7/16	10-50	ISO 13473-2(*)	RMS	100 mm	K_apu_7		
	Urien väli	9/64	10-50	ISO 13473-2(*)	RMS	100 mm	K_makro_K_RMS	K_makro_K_RMS	
	Oikea ura	11/16	10-50	ISO 13473-2(*)	RMS	100 mm	K_apu_11	K_makro_O_RMS	
		12/16	10-50	ISO 13473-2(*)	RMS	100 mm	K_apu_12		
		13/64	10-50	ISO 13473-2(*)	RMS	100 mm	K_apu_13		
		14/16	10-50	ISO 13473-2(*)	RMS	100 mm	K_apu_14		
		15/16	10-50	ISO 13473-2(*)	RMS	100 mm	K_apu_15		
Karkea makrokarkeus MPD	Vasen ura	3/16	10-50	ISO 13473-2(*)	MPD	100 mm	K_apu_3	K_makro_V_MPD	MPD-RMS (MPD-RMS)/RMS
		4/16	10-50	ISO 13473-2(*)	MPD	100 mm	K_apu_4		
		5/64	10-50	ISO 13473-2(*)	MPD	100 mm	K_apu_5		
		6/16	10-50	ISO 13473-2(*)	MPD	100 mm	K_apu_6		
		7/16	10-50	ISO 13473-2(*)	MPD	100 mm	K_apu_7		
	Urien väli	9/64	10-50	ISO 13473-2(*)	MPD	100 mm	K_makro_K_MPD	K_makro_K_MPD	
	Oikea ura	11/16	10-50	ISO 13473-2(*)	MPD	100 mm	K_apu_11	K_makro_O_MPD	
		12/16	10-50	ISO 13473-2(*)	MPD	100 mm	K_apu_12		
		13/64	10-50	ISO 13473-2(*)	MPD	100 mm	K_apu_13		
		14/16	10-50	ISO 13473-2(*)	MPD	100 mm	K_apu_14		
		15/16	10-50	ISO 13473-2(*)	MPD	100 mm	K_apu_15		
Megakarkeus RMS	Vasen ura	3/16	50-500	ISO 13473-5	RMS	100 mm	M_apu_3	Mega_V_RMS	MPD-RMS (MPD-RMS)/RMS
		4/16	50-500	ISO 13473-5	RMS	100 mm	M_apu_4		
		5/64	50-500	ISO 13473-5	RMS	100 mm	M_apu_5		
		6/16	50-500	ISO 13473-5	RMS	100 mm	M_apu_6		
		7/16	50-500	ISO 13473-5	RMS	100 mm	M_apu_7		
	Urien väli	9/64	50-500	ISO 13473-5	RMS	100 mm	Mega_K_RMS	Mega_K_RMS	
	Oikea ura	11/16	50-500	ISO 13473-5	RMS	100 mm	M_apu_11	Mega_O_RMS	
		12/16	50-500	ISO 13473-5	RMS	100 mm	M_apu_12		
		13/64	50-500	ISO 13473-5	RMS	100 mm	M_apu_13		
		14/16	50-500	ISO 13473-5	RMS	100 mm	M_apu_14		
		15/16	50-500	ISO 13473-5	RMS	100 mm	M_apu_15		
Makrokarkeus RMS	Vasen ura	5/64	0.5-50	ISO 13473-2	RMS	100 mm	Makro_V_RMS	Makro_V_RMS	MPD-RMS (MPD-RMS)/RMS
	Urien väli	9/64	0.5-50	ISO 13473-2	RMS	100 mm	Makro_K_RMS	Makro_K_RMS	
	Oikea ura	13/64	0.5-50	ISO 13473-2	RMS	100 mm	Makro_O_RMS	Makro_O_RMS	
Makrokarkeus MPD	Vasen ura	5/64	0.5-50	ISO 13473-2	MPD	100 mm	Makro_V_MPD	Makro_V_MPD	MPD-RMS (MPD-RMS)/RMS
	Urien väli	9/64	0.5-50	ISO 13473-2	MPD	100 mm	Makro_K_MPD	Makro_K_MPD	
	Oikea ura	13/64	0.5-50	ISO 13473-2	MPD	100 mm	Makro_O_MPD	Makro_O_MPD	

*) ISO-normista noikeaan vain aallonpituusalueen suhteen

(*) ISO-normista poiketaan vain aallonpituusalueen suhteen

Tunnuslukujen laskenta on periaatteessa suhteellisen helppoa, joten mukana suositellaan pidettäväksi makrokarkeudesta myös ne tunnusluvut, jotka lasketaan jakamattomalla aallonpituusalueella. Lopullinen mitattavien tunnuslukujen lukumäärä on 18 kpl ja niistä laskennallisten tunnuslukujen määrä 6 kpl.

8.3 Tietojen tallettaminen

Mittaustiedot uusista tunnusluvuista talletetaan kuntotietorekisteriin samaan tapaan kuin aiemminkin on tehty. Tallennusformaatti sisältää ensin täydellisen tiedoston, sitten tietoja mittauksesta ja lopuksi itse mitatut tunnusluvut. Mitattavia tunnuslukuja on kaiken kaikkiaan 18 kpl jos halutaan sisällyttää mukaan myös ne makrokarkeusmuuttujat, jotka lasketaan ISO-normin mukaiselta aallonpituusalueelta. Karkeusmittausten tulosten käytön kannalta voi olla hyödyllistä tallettaa myös mittausnopeus, koska se vaikuttaa hienon makrokarkeusmuuttujan mittaukseen. Mittausta- pahtumasta kannattaa lisäksi tallettaa kullekin riville (100 m tai 10 m) tieto mahdollisista out-of-trackeista, joilla ilmoitetaan jos tiellä on likaa tai ajourista on jouduttu poikkeamaan. Mittaukseen liittyvät tiedot syntyvät ura- ja tasaisuusmittausten yhteydessä, mutta karkeuden mittaamiseen liittyvä out-of-track-tieto ei ole aina sama kuin esim. tasaisuusmittauksessa syntyvä vastaava tieto. Nämä yksityiskohdat tulee määrittellä tarkemmin sitten kun tai jos mittauksia aletaan tehdä.

Hanketason raportointivälille, 10 m, tuotettavien tunnuslukujen formaatti on sama kuin 100 m raportointivälille ja se on esitetty liitteessä 8.

Lisäksi suositellaan tuotettavaksi 12 laskennallista tunnuslukua, jotka kuvaavat makrokarkeuden suuntaa. Aina kun tuotetaan sekä RMS että MPD niin niistä lasketaan

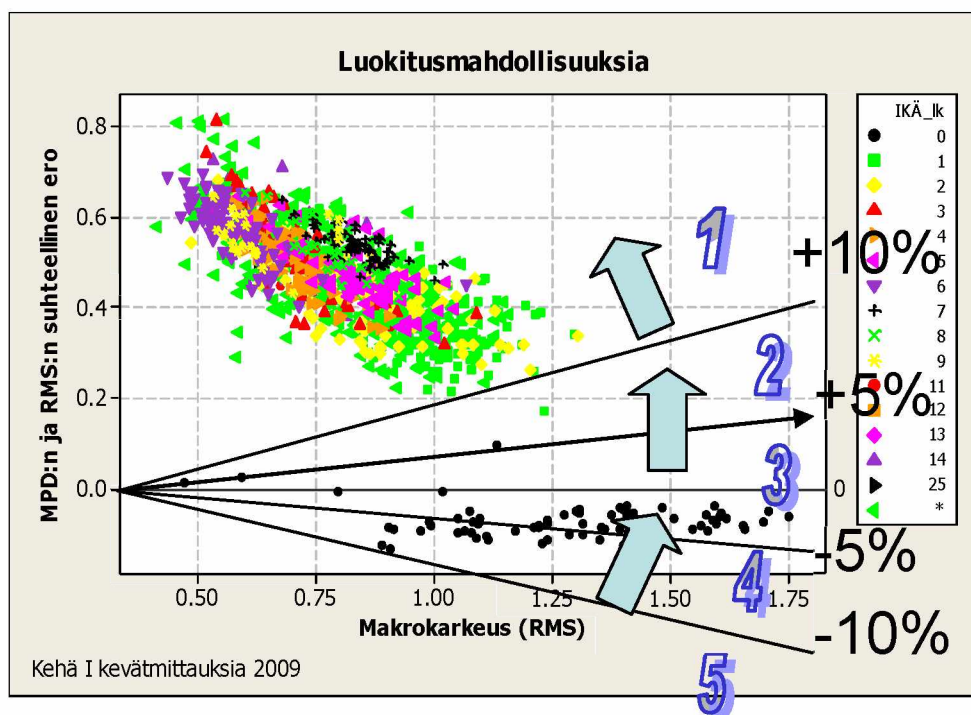
erotus MPD-RMS sekä suhteellinen erotus jaettuna saatu erotus RMS:llä. Tämä laskenta voidaan tehdä joko mittauksetietojen tuottamisen yhteydessä tai tietovarastossa kun tietoja luetaan sinne.

9 Jatkotutkimusehdotuksia

Akuuteimmat karkeustiedon määrittelyyn ja vaikutuksiin liittyvät jatkotutkimus-tarpeet:

Päällysteiden karkeuden kustannusvaikutukset. Karkeuden eri komponenttien kustannusvaikutusten laskemisessa tarvitaan tarkempia lähtötietoja. Nyt kirjallisuudesta saatavien lähtötietojen vaihtelualueet ovat melko laajoja, mikä tuo laskelmiin melko suuren vaihtelun. Tulisi selvittää tarkemmin ja parempia lähtötietoja käyttäen miten suuret pintakarkeudesta aiheutuvat hyödyt ja kustannukset koko tieverkolla ovat ja sen tiedon avulla tulisi kehittää siihen liittyvää kannattavuuslaskentaa ja siitä johdettavaa karkeuksiin liittyvää ohjeistusta.

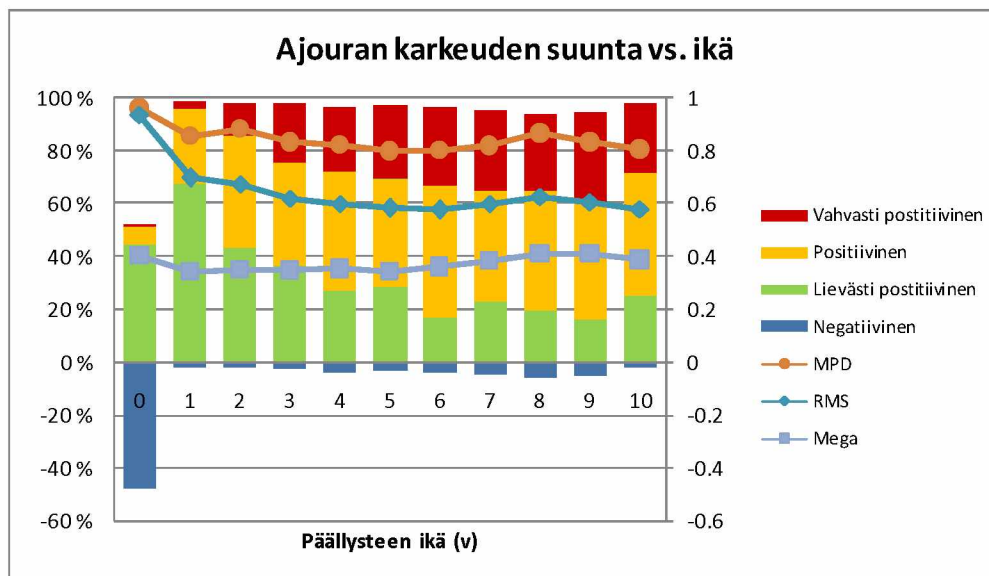
Negatiivisen ja positiivisen karkeuden laskenta. Eräässä amerikkalaisessa tutkimuksessa karkeuden suuntaa luokiteltiin MPD:n ja RMS:n suhteellisten erojen ja $\pm 5\%$ raja-arvosuorien avulla. Nämä suorat eivät näytä sopivan suomalaisiin päällysteisiin kovin hyvin (Kuva 30). Tulisi tutkia tarkemmin suomalaisella aineistolla, mitkä olisivat negatiivisen ja positiivisen karkeuden laskennan parametrit. Millä MPD:n ja RMS:n suhteilla karkeuden suunta on tunnistettavissa selkeimmin ja mitkä olisivat sen tavoiteltavat arvot? Tulisi kehittää suomalaisille päällysteille sopivampi laskentatapa.



Kuva 30. Kirjallisuudessa esitetyt $\pm 5\%$:n (ja $\pm 10\%$:n) rajat karkeuden suuntautuneisuudelle eivät näytä sopivan kovin hyvin suomalaisille päällysteille. Tulisikin selvittää mitkä luokitusperusteet sopisivat paremmin.

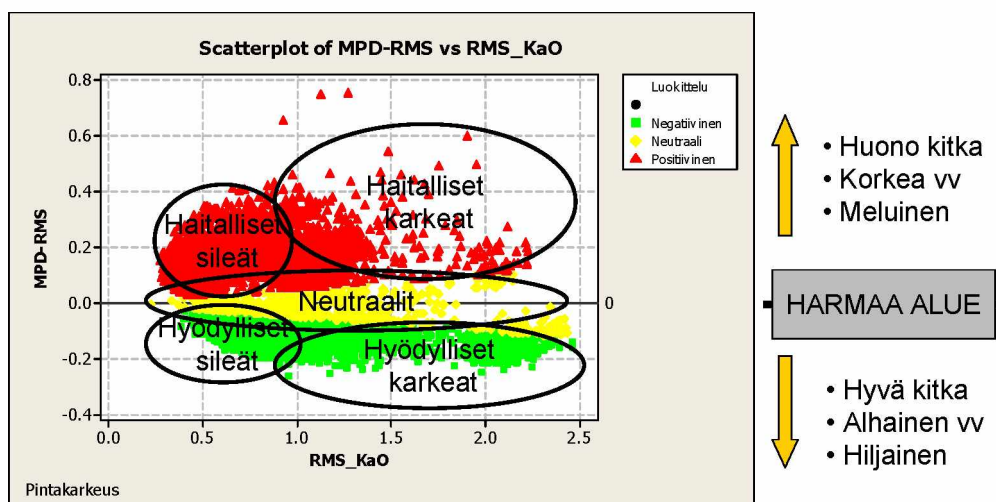
Karkeuden komponenttien ja sen suunnan pysyminen. Karkeuden hyödyllisten ominaisuuksien vaikutusaika ja niistä saatavat laskennalliset hyödyt riippuvat suunnan pysymisestä ja sen takia tulisi tutkia miten kauan karkeuden eri tunnusluvut ja niistä saatava suunta tai muut hyödylliset ominaisuudet pysyvät eri tilanteissa ja eri koh-teissa ja miten ne muuttuvat eri vuodenaikoina (Kuva 31). Yhdenkin vuoden pitene-

minen pysymisajassa parantaisi tilannetta. Kuvassa on tuloksia eri-ikäisten päällysteiden suunnasta. Sitä tulisi tutkia samoja kohteita seuraamalla.



Kuva 31. Kesän 2009 PT-mittauksista on nähtävissä, että karkeuden negatiivista suuntautuneisuutta ei saada pysymään Suomessa kovin pitkään. Kuva on laadittu käyttäen massamittauksia. Asiaa kannattaisi tutkia yksittäisillä kohteilla siten, että seurattaisiin tiettyjä samoja kohteita useamman vuoden, jolloin pysymisen laajuus ja siihen mahdollisesti vaikuttavat syyt selviäisivät.

Karkeuden suunnan vaikutus vierintävastukseen, meluun ja kitkaan. Eräissä tutkimuksissa on mainittu, että negatiivisen karkeuden päällysteellä toteutuvat useat eri tavoitteet (melun lisäksi joko kitka tai vierintävastus).



Kuva 32. Uusien päällysteiden ja takuukohteiden karkeuksia ja karkeuden suuntautuneisuutta. Vaikutusten hyödyllisyyden ja haitallisuuden arvelaan riippuvan karkeuden suunnasta.

Tulisi tutkia joko laboratoriokokeilla tai kenttäkokeilla, miten karkeuden suunta vaikuttaa vierintävastukseen, meluun ja kitkaan (Kuva 32). Kokeissa tarvittaisiin sekä vierintävastus-, melu-, kitka- että karkeusmittauksia. Samalla tulisi myös tutkia mitkä

eri laskentatavoilla määritetyt karkeudet (RMS, MPD, RRMS, FRMS) vaikuttavat eniten.

Päällystystekniikkaan liittyvä kehittäminen:

Päällystystyyppien ja -tekniikoiden vaikutus karkeuden suuntaan. Tulisi tutkia, miten eri päällystetyypit ja päällystetekniikat (esim. tiivistystavat) vaikuttavat karkeuden suuntaan (negatiivinen/positiivinen).

Päällysteen kiviaineksen maksimiraekoon vaikutus karkeuteen. Eräissä tutkimuksissa on todettu kuinka päällysteen materiaaleilla pystytään vaikuttamaan karkeuteen. Tiettyjen seulakokojen kiviaineksilla on selvä vaikutus siihen, mitä makrokarkeutta päällysteeseen tulee. Tulisi tutkia, mihin karkeustasoihin eri maksimiraekokojen kiviainekset (sekä ylipäättään rakeisuuskäyrä) johtavat uusilla ja käytetyillä päällysteillä.

Eräitä vierintävastukseen liittyviä täydentäviä tutkimusaiheita:

Sivukaltevuuden vaikutus vierintävastukseen

Koska sivukaltevuus pyrkii työntämään autoa pois tieltä, täytyy ajamisen aikana sivukaltevuuden vaikutus kompensoida vastavoimalla. Tämän vastavoiman energia otetaan luonnollisesti polttoaineesta ja näkyy siten vierintävastuksessa. Lähtöoletuksena on, että vierintävastus lisääntyy kun sivukaltevuus kasvaa.

Urasyvyyden vaikutus vierintävastukseen. Koska ajoneuvo ei ole koskaan tasaisesti urien pohjalla, vaan ajon aikana aina joko uran oikeassa tai vasemmassa reunassa, aiheutuu urasyvyydestä lisäsivukaltevuutta ajoneuvoon. Tämä ilmiö aiheuttaa luonteeltaan samanlaisen vierintävastuksen lisäyksen kuin sivukaltevuus.

Renkaiden kulumisen eri maissa. Renkaiden uusimismääristä ja kunnosta on Autonrengasliiton tekemiä arvioita/selvityksiä. Tulisi selvittää tarkemmin miten suurta rengaskulumisen eri maissa on ja miten Suomen tilanne poikkeaa muista maista.

Suomalaisten päällysteiden karkeus, vierintävastus, melu ja kitka –yhteisselvitys. Jossa selvitetäisiin mittaamalla mitä luokkaa vierintävastukset, melutasot ja kitka-arvot ovat suhteessa kattavasti mitattuihin karkeusmuuttujiin eri vuodenaikoina. Selvitysprojekteissa yleensä halutaan erilaisia raja-arvoja liian vähäisen tutkimuksen perusteella. Tulisikin selvittää millä vaihtelualueella päällysteiden karkeus ja sitä vastaavat vaikutukset todellisuudessa ovat ja vasta sen pohjalta täsmennettäisiin raja-arvoja.

Kansainvälisen tutkimustoiminnan hyödyntäminen. Päällysteiden karkeuteen, meluun, kitkaan ja vierintävastukseen liittyviä kansainvälisiä tutkimusohjelmia ja projekteja on menossa useita, mutta niistä puuttuu usein suomalainen edustus. Kansainvälisten tulosten hyödyntämisen kannalta sekä niihin vaikuttamisen kannalta tulisi lisätä osallistumista ja perustaa sellaisia projekteja, joilla tuodaan ja sovelletaan saatuja tutkimustuloksia Suomen olosuhteisiin ja toisaalta vaikutetaan tutkimusohjelmien tavoitteisiin ja sisältöihin niin, että Pohjoismaiset olosuhteet tulisivat niissä paremmin huomioitua. (esimerkiksi NordFou).

Päällysteiden suunnitteluohjeiden uusiminen. Karkeuden hallinta kulminoituisi viime kädessä siihen, miten päällystystekniikoiden vaikutusmahdollisuudet kehittyvät ja

huomioivat karkeuteen liittyvät tavoitteet. Nykyisissä suunnitteluohjeissa painottuu erittäin merkittävästi vain yksi näkökulma: kulutuskestävyys. Tulisi kehittää päällysteiden suunnitteluohjeistoa siten, että tien pinnan ominaisuudet (esimerkiksi pinnan karkeustiedoilla lisättynä) ja niihin liittyvät lukuisat eri vaikutukset tulisivat paremmin tasapainotettua ja optimoitua. Suunnitteluohjeistoa tulisi myös kehittää siitä näkökulmasta, että se edistäisi uusien parempien päällysteiden kehittymistä.

10 Yhteenveto ja johtopäätökset

Päällysteiden pintakarkeuksia mitataan kolmen tai neljän eri tunnusluvun avulla. Useimmiten tunnusluvut jaetaan käsitteisiin mikrokarkeus, makrokarkeus ja megakarkeus. Mikrokarkeus on päällysteen kivirakeiden pinnan epätasaisuutta ja se vaikuttaa renkaan ja päällysteen välisen kitkan muodostumiseen kasvattaen sitä. Sitä mitataan ns. RMS-arvona. Mikrokarkeus on toivottava ominaisuus, koska se parantaa kitkaa ja sen arvo saisi olla mahdollisimman suuri. Mikrokarkeutta ei pystytty vielä mittaamaan kovin luotettavasti nopeilla mittausten menetelmillä.

Makrokarkeus on päällysteen kivirakeiden ja renkaan kumipalojen mittakaavassa olevaa pinnan epätasaisuutta ja se vaikuttaa kitkaan, meluun ja vierintävastukseen. Makrokarkeutta mitataan sekä RMS- että MPD-arvoina (lisäksi myös MTD-arvona). Sen vaikutus rengasmeluun on kahdensuuntainen. Lyhyen aallonpituusalueen makrokarkeus parantaa päällysteen meluominaisuuksia, koska se mahdollistaa ilman liikumisen renkaan ja päällysteen kosketuspinnassa ja pienentää siten suuritaajuuksista melua. Pitemmän aallonpituusalueen makrokarkeus kasvattaa melua, koska suuremmat epätasaisuuden aiheuttavat lisää värähtelyä renkaan ja päällysteen kontaktipinnassa. Näiden kahden aallonpituusalueen välinen raja on 10-20 mm. Useimmiten suositellaan 10 mm rajaa. Makrokarkeuden ja melun välisestä riippuvuutta kuvattaessa käytetään usein MPD-arvoa, mutta myös RMS-arvoa on käytetty. MPD-arvon on todettu vaikuttavan suurilla nopeuksilla myös kitkaan, koska se kasvattaa renkaan ja päällysteen pinnan välisiä hystereesivoimia. Makrokarkeuden on todettu lisäävän myös renkaan vierintävastusta ja kasvattavan siten polttoaineen kulutusta. Vierintävastuksen ja karkeuden välistä yhteyttä tutkittaessa on yleensä käytetty RMS-arvoja.

Megakarkeus on edellisiä suuremman aallonpituusalueen karkeutta ja sitä luonnehditaan usein tien epätasaisuudeksi. Se huomioi niitä päällysteen pinnassa olevia lyhytaaltoisia epätasaisuuksia kuten nypytystä, halkeamia, reikiä, sillan liikuntasauvoja jne., joita epätasaisuusmuuttuja IRI ei huomioi. Se vaikuttaa vierintävastukseen, meluun, kitkaan ja ajoneuvon kulumiseen sekä kasvattaa raskaiden ajoneuvojen tien aiheuttamaa dynaamista räsitusta. Megakarkeutta mitataan RMS-arvoina. Sen suuria arvoja tulee välttää. Megakarkeutta on tutkittu melko vähän ja jostain syystä se on jäänyt tutkimuksissa usein pois tien pintaa kuvaavista tunnusluvuista. Sen vaikutusten on raportoitu olevan samansuuruisia kuin makrokarkeudella tai epätasaisuudella (IRI).

Päällysteen karkeustiedon merkitystä on selvitetty karkeuteen ja sen vaikutuksiin liittyvien mekanismien kautta. Tosin tässä selvityksessä ei ole ollut tarkoitus mennä niihin kovin syvälle. Makrokarkeuden kehittymistä mekanismina on käsitelty eniten ja mikrokarkeuden ei oikeastaan ollenkaan. Suomessa käytettyihin maanteiden päällysteisiin liittyy sellainen ominaisuus, että päällysteiden makrokarkeus (RMS) on alussa suurta ja pienenee päällysteen ikääntyessä. Päällysteiden karkeus on uutena ikään kuin huonoa ja se paranee ikääntyessä, mikä on epäloogista. Makrokarkeus on keskimäärin suurempaa ajourissa kuin niiden välissä.

Makrokarkeuteen liittyy aallonpituusalueen ja siinä vallitsevan amplitudin lisäksi sen suuntaa kuvaava ominaisuus niin, että pintatasosta alaspäin suuntautuvaa karkeutta sanotaan negatiiviseksi ja ylöspäin suuntautuvaa karkeutta sanotaan positiiviseksi. Negatiivinen karkeus on suositeltavaa erityisesti melun kannalta, koska rengas synnyttää siinä vähemmän melua. Lisäksi se vaimentaa syntynyttä melua. Negatiivisen

karkeuden vallitessa on väitetty myös kitkan ja vierintävastuksen olevan parempia. Näistä ei ole kuitenkaan tutkimustuloksia saatavissa. Karkeuden suuntaa pystytään mittaamaan käyttämällä makrokarkeuden MPD- ja RMS-tunnuslukuja samanaikaisesti laskemalla niiden suhteellista eroa. Tämän selvityksen kaksi pääasiallista löytöä ovat makrokarkeustunnuslukuun tarvittavat muutokset. Se tulisi jakaa aallonpituusalueeltaan kahteen osaan 10 mm:n kohdalta ja siitä tulisi mitata molemmat tunnusluvut (MPD ja RMS), joiden avulla saadaan laskettua kolmas tunnusluku, suunta. Muutoksista seuraa kuitenkin se, että makrokarkeuden kehittymiseen ja vaikutusten määrittämiseen tarvitaan mittauksia ja tutkimusta ennen kuin sen täysimittaista hyödyntämistä voidaan tarkemmin ohjeistaa.

Megakarkeus on ominaisuus, joka pysyy päällysteen elinkaaren ajan melkein vakiona. Alemmalla tieverkolla se kasvaa hiukan tien ikääntyessä. Megakarkeuteen vaikuttaa siten päällystystyön onnistuminen. Megakarkeus on yleensä suurempaa ajourissa kuin ajourien välissä.

Päällystesuunnittelussa on hallitsevana Suomessa urautumiskestävyys, koska henkilöautoissa käytetään talviaikaan nastoja. Päällystemassojen koostumuksen määräävät juuri urautumiskestävyyteen liittyvät ominaisuudet kuten esim. 16 mm maksimi-raekoko. Vilkasliikenteisten teiden melutasot ovat taajama-alueilla melko suuria ja melulle altistuukin maanteiden varsilla noin 350 000 henkilöä. Melulle altistuvien määrästä tehdyt laskennalliset haittakustannukset ovat noin 120 M€ vuodessa. Suomessa on kehitetty vähemmän melua tuottavia päällysteitä ja niillä onkin saatu aikaan noin 3 dB:n vähenemä melutasoissa.

Tieliikenne käyttää polttoaineenaan pääosin uusiutumattomia luonnonvaroja. Maanteiden liikennesuorite on noin 35 Mrd.ajonkm vuodessa ja siinä kulutetaan noin 3900 milj.littraa polttoainetta. Syntyvä hiilidioksidipäästöjen määrä on noin 9100 milj.kg. Uusiutumattomien luonnonvarojen vähyys ja ilmastonmuutos pakottavat suunnittelemaan kaikkea toimintaa siten, että niitä säästettäisiin mahdollisimman paljon. Euroopassa on menossa useita tutkimusohjelmia, joissa pyritään kehittämään suunnittelukäytäntöjä ilmastolle edulliseen suuntaan. Myös tienpidossa ollaan kehittämässä käytäntöä niin, että pystyttäisiin säästämään luonnonvaroja ja saastuttamaan vähemmän. Tämä tarkoittaa mm. että päällysteiden ylläpidossa huomioidaan melu, turvallisuus ja polttoaineen kulutus aiempaa paremmin. Päällysteitä tulee suunnitella siihen suuntaan, että niiden aiheuttama melu ja vierintävästus ovat pienempiä. Tätä taustaa vasten voidaan todeta, että myös Suomessa on mahdollisuuksia suunnittelun parantamiseksi.

Vierintävastuksia on selvitetty sekä laboratoriokokeilla että kenttämittauksilla. Päällysteen pinnan ominaisuudet voivat pahimmillaan kaksinkertaistaa vierintävastuksen. 10 %:n muutos vierintävastuksessa aiheuttaa henkilöautojen polttoaineen kulutukseen noin 2 %:n ja raskaiden autojen kulutukseen noin 3-6 %:n lisän. Yhden millimetrin lisäys karkeuksien RMS-arvoissa aiheuttaa keskimäärin 12.4 %:n lisäyksen vierintävastuksiin. Päällysteen karkeuden vaikutus henkilöauton polttoaineen kulutuksessa on noin 0.26 litraa/100km. Tutkimusten vaikutusarviot kuitenkin vaihtelevat melko paljon.

Päällysteen karkeuden vaikutukset ovat monitahoiset. Selviä vaikutuksia ovat ainakin melu- ja vierintävästusvaikutukset. Sillä perusteella päällysteiden pintakarkeuksien mittaamista ja hallintaa kannattaa jatkaa ja kehittää. Tutkimustulosten soveltuminen Suomen olosuhteissa tulee varmistaa.

Karkeuden hallintaa esitetään kehitettäväksi uudistamalla tunnuslukuja ja parantamalla niiden mittaamista, luokittelemalla ja ohjeistamalla niiden käyttöönottoa. Lisäksi esitetään jatkotutkimusehdotuksia karkeuden vaikutusten täsmentämiseksi Suomen olosuhteisiin.

Karkeusmittaukset kannattaa suorittaa mittaamalla ajourien karkeudet useammasta kohdasta ja useammalla tunnusluvulla. Hienon makrokarkeuden mittausperiaatteet ja mittauslaitteilta vaadittavat ominaisuudet tulisi määrittää tarkemmin.

Hienoa makrokarkeutta tulisi maksimoida ja megakarkeutta minimoida. Karkean makrokarkeuden suhteen tulee mitata sen molemmat tunnusluvut ja tehdä niiden avulla laskennallinen suuntaa kuvaava muuttuja, jonka käyttäytymisestä tulee hakea kokemuksia ja lisätietoa. Hienolle makrokarkeudelle ja megakarkeudelle voidaan tehdä kuntoluokitus ja raja-arvot. Karkean makrokarkeuden luokitusta tai raja-arvoja voidaan määrittää vasta lisätutkimusten jälkeen.

Karkeuden hallinnan askeleet ovat karkeustiedon hallinta, karkeuden vaikutusten ja syy-seuraussuhteiden tutkiminen ja karkeusnäkökulman painoarvon nostaminen päällystesuunnittelussa. Akuuteimmat jatkotutkimusaiheet ovat karkeuden kustannusvaikutusten selvittäminen ja makrokarkeuden suuntaan liittyvä lisätutkimus.

Kansainvälisiä tutkimusohjelmia kannattaa seurata ja niiden tuloksia Suomen olosuhteisiin kannattaa jalkauttaa.

Lähdekirjallisuus ja viitteet

1. Päällysteiden ylläpidon toimintalinjat. Tiehallinto. Helsinki 2006.
2. Rantanen Kati (2005): Päällysteen karkeustiedon hyödyntämismahdollisuudet. D-työ. Espoo 2005.
3. Lampinen Anssi (2004): Tien pituussuuntaisen epätasaisuuden vaikutus ajoneuvojen vierintävastukseen ja polttoaineen kulutukseen. Kirjallisuusselvitys. Tiehallinnon selvityksiä 44/2004. Helsinki 2004.
4. The Little Book of Quieter Pavements. FHWA. July 2007.
5. Sayers, M., Karamihas, S. (1998): The Little Book of Profiling. Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles. The Regent of the University of Michigan.
6. Sandberg U, Ejsmont Jerzy A.(2002): Tyre/Road Noise Handbook. Informex. 2002.
7. Unhola Timo (2004): Nastarenkaiden kuluttavuus. Ajoneuvotekijöiden vaikutus. Yliajokoe 2004. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 72/2004.
8. Virtala Pertti (2004): Vesiliirron riski uraisilla teillä. Tiehallinto 2004. Julkaisematon esittelyaineisto.
9. Julian Weber (2009): Automotive Development Processes, Springer 2009.
10. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2002/44/EY terveyttä ja turvallisuutta koskevista vähimmäisvaatimuksista työntekijöiden suojelemiseksi altistumiselta fyysikaalisista tekijöistä (tärinä) aiheutuville riskeille.
11. Granlund Johan (2008): Healt Issues raised by poorly maintained road networks. 6th Symposium on Pavement Surface Characteristics.. SURF 2008, Portoroz, Slovenia.
12. Blokland G.J, Schwanen W., Boere S.W (2009): Influence of Road Surface Characteristics on Rolling Resistance. Tyre Expo. Hannover 2009.
13. Tires and Passenger Vehicle Fuel Economy. Informing Consumers, Improving Performance. TRB Special Report 286. Transportation Research Board. Washington, D.C. 2006.
14. S.Sitters, A. (1993): de Vos of TNO automotive Rolweerstand van autobanden, TNO rapport 93. OR. VD.007.0/APDV, 1993 in order of NOVEM.
Glaeser K-P (2005): Rolling Resistance of Tyres on Road Surfaces – Procedures to Measure Tyre Rolling Resistance. Energy Efficient Tyres, IEA, Paris. 15-16.11.2005.
15. Pinnan karkeuden mittaust. Osa 1: Profiilin keskisyvyyden määrittäminen, laser menetelmä. SFS-EN ISO 13473-1. 29.11.2004.

16. Characterisation of pavement texture by use of surface profiles – Part 5: Determination of megatexture. ISO 13473-5. 2009.
17. Jacobson Tornbjörn (2004): Ytbehandling med modifierad emulsion – Provvägsförsök på väg 84, Hälsingland, Uppföjningar 2001-2003, Väg- och transportforskningsinstitutet, VTI notat 5-2004, Projektnummer 60617, Projektnamn Tankbeläggningar, 2004.
18. Bjarne Smidth, Birger Roland Jensen (2005): Friktion og MPD-tal. Eksternt notat 33. Vejteknisk institut.
19. Asfalttinormit 2008. Päällystealan neuvottelukunta PANK ry.
20. Jouko Lahti, Mika Savolainen (2009): Kesärengastutkimus 1997-2008. Henkilö- ja pakettiautojen renkaiden kunto syksyn rengasratsioissa. Autonrengasliitto.
21. Pinnoitetut renkaat. Laatusuhteita, taloudellisuutta ja ympäristöä ajatellen. Autonrengasliitto.
22. Mika Räsänen, Kaarle Kupiainen, Heikki Tervahattu, Akseli Torppa (2006): Kevään merkki – Tienpintojen kuivuminen nostaa katupölyn ilmaan ja otsikoihin. GEOLOGI 58/2006.
23. Kokkonen Jarno (2008). Rengasmelun emissio ja leviäminen. Diplomityö. TKK 2008.
24. Keulen W., van Duskov M. (2005): Inventory study of basic knowledge on tyre/road noise.
25. Tervahattu Heikki, Kupiainen Kaarle, Sainio Panu, Räsänen Mika, Lahti Tapio, Pirjola Liisa, Karppinen Ari (2006): Vierintämelun vähentäminen. VIEME-tutkimus- ja kehittämisprojektin esiselvitys. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisu 12/2006.
26. Wynand Steyn, M.Haw: The Effect of Road Surfacing Condition on Tyre Life. CSIR Transportek, Pretoria. Bridgestone SA Ltd.
27. Timo Nurmi (2008): Korvat soiden – Vertailussa autojen sisämelu. Moottori-lehti. 1.5.2008.
28. Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Structures. FEHRL Report 2006/02.
29. Roovers (2005): Round Robin Test Rolling Resistance energy consumption, DWW-Report 2005-046, Delf 31.May 2005.
30. Stijn Boere, Ines Lopez Arteaga, Henk Nijmeijer (2009): Prediction of road texture influence on rolling resistance and tyre/road noise. Euronoise 2009. Edinburgh, Scotland.
31. Lahti, T. (1997): Akustinen mittaustekniikka, Teknillinen korkeakoulu, Akustiikan ja äänenkäsittelyn laboratorio, raportti 38, Espoo 1997.

32. Kuntotietorekisteri 2009. Tiehallinto.
33. Wright Alex (2008): Assessment of surface ravelling using traffic speed survey techniques. 6th symposium of pavement characteristics. SURF 2008. Portorož, Slovenia.
34. Valtonen Jarkko (2008): The Possibilities of Utilising Data Gathered from Laser Measurements of Pavement Surface Texture. 6th symposium of pavement characteristics. SURF 2008. Portorož, Slovenia.
35. Nitsche Philippe, Spielhofer Roland (2009): Report on policies and standards concerning skid resistance, rolling resistance and noise emissions. Deliverable D6. TYROSAFE, Feb 2009.
36. Kane Malal, Scharnigg Karen (2009): Report on different parameters influencing skid resistance, rolling resistance and noise emissions. Deliverable D10. TYROSAFE, Aug. 2009.
37. Do, M T & Kane M (2009): Physical model for the prediction of pavement polishing, Wear 267, pp 81-85.
38. Jacobson Torbjörn, Hjort Mattias (2007): Polering av asfaltbeläggning. VTI notat 25-2007.
39. Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements. Industry Report. March 2004. Eurobitume EAPA.
40. Shaffer S.J., Christiaen A.-C., Battelle M.J.Rogers (2006): Assessment of Friction-Based Pavement Methods and Regulations. National Transportation Research Center Incorporated, NTRCI.
41. Kevin K. McGhee, Gerardo W. Flintsch (2003): High Speed Texture Measurement of Pavements. Department of Civil and Environmental Engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University.
42. Sleeper Andrew (2006): Design for Six Sigma Statistics. 59 Tools for Diagnosing and Solving Problems in DFSS Initiatives. McGraw-Hill.
43. Breyfogle Forrest W. (2003): Implementing Six Sigma. Smarter Solutions Using Statistical Methods. Second Edition. John Wiley & Sons inc. New Jersey.
44. Hironari Ape, Akinori Tamai, J.J. Henry, James Wambold (2001): Measurement of Pavement Macrottexture with Circular Texture Meter. Transportation Research Record 1764. Paper 01-3519.
45. Marko Kelkka, Ilmo Hyypä, Nina Raitanen, Jarkko Valtonen, Panu Sainio (2003): Hiljaiset päällysteet - tuotevaatimukset ja mittarit. Teknillinen korkeakoulu.
46. Vierintämelun vähentäminen. VIEME-tutkimus- ja kehittämishankkeen loppuraportti. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisu 4/2008. Helsinki 2008.

47. Lowne, R.W. (1969): The effect of road surface texture on tyre wear, TRRL Report LR 265, Crowthore, Berkshire.
48. Steven, H., Kupperts, D., van Blokland, G.J., van Houten, M.H., van Loon, R. (2000): International Validation Test for the Close Proximity Method (CPX). CDROM from M+P Raadgevende ingenieurs bv, Bruistensingel 232, NL-5232 AD 's-Hertogenbosch, the Netherlands.
49. Sandberg, U (2000): Văgytans inverkan på trafikbuller – emissionen - korrek-tionstabeln för effektsambandsmodeller. VTI notat 30-2000.
50. Käsikirja päällysteiden kunnon mittaamiseen. Tiehallinnon selvityksiä 21/2007. Helsinki. 2007.
51. Kendziorra N., Wies B., Steinauer B., Schulze Chr, Ueckermann A. Meyer A. (2009): Integrale Betrachtung der Fahrbahngriffigkeit aus Reifen / Fahrbahnsich. Interna-tionale VDI Tagung Reifen – Fahrwerk-Fahrbahn. Hannover, October 21th 2009.
52. Genta G., Morello L. (2009): System Design. The Automotive Chassis. Volume 2. Springer 2009.
53. Virtala P. (2007): Talvihoidon laadunmittauksen tuotantolaatu. Esitys Tiehallinnon hoitoverkolle 29.5.2007.
54. Meegoda, J.N., Shengyan, G., Gephart, N.C (2009): Prediction of Skid Resistance using Pavement Texture Data collected at High Speeds. TRB 2010 Annual Meeting. Washington DC, USA.

Haastattelut/kyselyt

1. Kyösti Laukkanen. VTT. (12.11.2009)
2. Anssi Lampinen. AL-Engineering Oy. (13.11.2009)
3. Tiit Kaal. Technokeskus. Eesti. (17.11.2009)
4. Bjarne Smidth. Tanska. (16.11.2009)
5. Johan Lang. VV/Ruotsi (8.1.2010)

Linkkejä:

<http://www.trl.co.uk/silvia/>

<http://tyrosafe.fehrl.org>

<http://www.imagine-project.org/>

http://www.roadtechnology.se/ecrpd.eu/files/ECRPD_Home_Finnish.pdf

Asiakasanalyysi

Asiakasanalyysi muodostuu asiakkuusryhmistä, laatuattribuuteista ja tuotetta tai palvelua kuvaavista teknisistä tunnusluvuista ja mittareista. Asiakasosan ryhmillä kuvataan eri näkökulmia; yhteiskunta, urakoitsija, tienpitäjä. Tämän jälkeen on määritetty, minkälaiset laatuattribuutit kuvaisivat tien päällysteen ominaisuuksia. Karkean tason laatuattribuuteiksi on valittu ajomukavuus, turvallisuus, taloudellisuus, ekologisuus ja sujuvuus. Karkeat laatuattribuutit on arvioinnin helpottamiseksi edelleen jaettu alemman tason attribuuteiksi. Laatuattribuuttien kokonaismäärää ei kasvateta liaksi, jotta myöhempi vaikutusluokkien arviointi ei paisuisi liian suureksi. Saadun taulukon tulos on oikeassa reunassa olevat kaksi painokertoimia kuvaavaa saraketta, joilla painotetaan myöhemmin tehtäviä vaikutusluokkia. Painokertoimien muodostamisen avuksi taulukossa on mahdollisuus painottaa eri asiakkuusryhmiä eri tavalla ja saada siten eri ryhmien ”ääni” esille. Oletusarvona ovat tasaiset painot (17 %).

Taulukko jatkuu oikealle seuraavan taulukon (taulukko 1.2) muodossa siten, että kunkin rivin kohdalla on arvioitu miten suuri vaikutuskerroin (0=ei vaikutusta, 1=lievä vaikutus, 3=kohtalainen vaikutus, 9=voimakas vaikutus) liittyy kuhunkin sarakkeeseen (=tien teknisiin ominaisuuksiin). Tien teknisiin ominaisuuksiin on otettu pintakuntoa kuvaavia tunnuslukuja sekä tien päällystettä, geometriaa ja rakennetta kuvaavia tunnuslukuja, koska kuntotunnuslukujen tärkeyden arvioinnissa usein sivutaan niitä ominaisuuksia, vaikka ne eivät olekaan perinteisin ylläpitotoimin muutettavissa.

Taulukko 1.1. Asiakasanalyysin asiakkuusryhmät ja laatuattribuutit sekä niille lasketut keskinäiset painot, case vilkasliikenteiset tiet, ylläpitoluokka Y1.

Vilkaat tiet (Y1)				Asiakkuusryhmät						painoarvo	KA
				MoT	Ha-liikenne	Raskasliikenne	Urakoitsija	Yhteiskunta	Tienomistaja		
Laatuattribuutit											
Taso 1	Taso 2		Painokerroin	17 %	17 %	17 %	17 %	17 %	17 %		
Ajomukavuus	Ajotuntuma	1	1.0	9	3	3	0	0	0	2.5	1.9
	Tärinä	2	1.0	9	3	3	0	0	0	2.5	
	Melu autossa	3	1.0	1	3	1	0	0	0	0.8	
Turvallisuus	Vesiliitoriski	4	1.0	9	9	1	1	3	1	4.0	3.8
	Suistumisriski	5	1.0	9	3	3	3	3	1	3.7	
	Yllätyksellisyys	6	1.0	9	3	3	3	3	1	3.7	
Taloudellisuus	Tien käyttäjän kust.	7	1.0	1	3	9	0	1	0	2.3	2.9
	Ylläpidon taloudellisuus	8	1.0	0	0	0	9	3	9	3.5	
	Hoidon taloudellisuus	9	1.0	0	0	0	9	3	9	3.5	
	Tien pääoman säilyminen	10	1.0	0	0	0	1	9	3	2.2	
Ekologisuus	Energiatehokkuus (PA)	11	1.0	1	1	1	1	9	0	2.2	1.3
	Materiaalitalous (asfaltti)	12	1.0	0	0	0	1	1	3	0.8	
	Melu ympäristölle	13	1.0	0	0	0	1	3	3	1.2	
	PA-päästöt	14	1.0	0	3	1	0	3	1	1.3	
	Pölypäästöt	15	1.0	0	0	0	3	3	1	1.2	
Sujuvuus	Nopeus, matka-aika	16	1.0	3	9	9	0	3	0	4.0	4.1
	Rajoituksettomuus, täsmällisyys	17	1.0	3	3	9	1	9	0	4.2	
				3.2	2.5	2.5	1.9	3.3	1.9	43.5	

Vaikutusten arvioinnin on suorittanut konsultin kolme asiantuntijaa. Arviointi on suoritettu vilkasliikenteistä tietä ajatellen. Lopullinen tulos on vaikutustaulukon painotettu vaikutuskerroinrivi (alin rivi), jolla nyt kuvataan tien pinnan ominaisuuksien tärkeyttä. Tämä rivi voidaan esittää seuraavan kuvan tavoin järjestämällä ominaisuuksia kuvaavat mittarit ensin tärkeyttä kuvaavan painokertoimen suhteen suuruusjärjestykseen ja tarkastelemalla mitkä mittarit ovat tärkeydessä etusijalla.

Taulukko 1.2. Pinnan ominaisuuksien (tekniset mittarit) vaikutukset laatuattribuutteihin (kukin rivi tässä taulukossa vastaa edellisen taulukon riviä).

Tekniset mittarit																						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Rakenne			Geometria		Pituussuunta			Poikkisuunta			Päälystevauriot			Kestävyys					Tasalaatuisuus			
Päälyste	Leveys	Nopraus	Mäki-syys	Kaarteisuus	IRI	Heitot	Karkeus	Ura	Harjanne	Sivukaitevyys	Purkaumat	Halkaumat	Reiät ja paikat	In_noppi	Ura_noppi/harj_noppi	Vaurionoppi	Reikerteenika	Päälysteenika	IRI-vaihtelu	URA-vaihtelu	VS-vaihtelu	Sivukvaihtelu
3	1	1	3	1	9	9	3	1	0	1	1	1	3	0	0	0	0	0	3	1	1	3
9	0	1	0	0	3	3	9	1	0	0	1	1	3	0	0	0	0	0	1	1	1	1
9	0	3	0	0	1	1	9	1	0	0	1	3	3	0	0	0	0	0	1	0	0	1
3	3	3	1	1	0	0	1	9	0	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	3	0	1
1	3	3	1	9	1	3	3	1	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	1	1	0	3	1	1	0	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	3	0	3
1	0	3	3	1	3	1	3	3	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	3	1	1	0	3	1	1	9	0	3	1	9	3	1	9	9	3	1	1	3	0	1
3	3	3	3	3	0	1	3	3	1	3	1	9	9	1	3	9	0	0	1	1	1	1
3	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	0	0	1	1	1	1
3	0	9	9	1	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	9	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	9	1	1	1	0	9	0	0	0	3	1	3	0	0	0	0	0	1	0	1	1
3	1	9	9	1	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	9	1	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	9	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	9	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.7	1.8	4.2	2.1	1.9	1.5	1.7	2.3	2.4	0.1	1.4	0.7	1.9	2.0	0.3	1.1	1.6	0.2	0.1	0.5	1.0	0.3	0.9

Karkeuskeskiarvoja 2009

Kesämittauksia 2009

Makrokarkeus RMS

Päällystetyyppi	VT	KT	ST	YT	Yhteensä
AB	0.60	0.58	0.55	0.54	0.57
PAB-B	0.55	0.64	0.58	0.58	0.59
PAB-O	0.56	0.43		0.55	0.56
PAB-V	0.67	0.64	0.65	0.60	0.63
SMA	0.81	0.74	0.66	0.70	0.78
SOP			0.54	0.74	0.73
Yhteensä	0.66	0.62	0.60	0.58	0.61

Makrokarkeus MPD

Päällystetyyppi	VT	KT	ST	YT	Yhteensä
AB	0.81	0.80	0.78	0.78	0.79
PAB-B	0.73	0.85	0.81	0.81	0.81
PAB-O	0.76	0.63		0.83	0.77
PAB-V	0.92	0.84	0.89	0.84	0.86
SMA	1.00	0.99	0.90	0.97	0.98
SOP			0.69	1.09	1.07
Yhteensä	0.86	0.83	0.83	0.82	0.83

Makrokarkeuden suunta

Päällystetyyppi	VT	KT	ST	YT	Yhteensä
AB	58 %	42 %	70 %	57 %	59 %
PAB-B	35 %	65 %	39 %	44 %	45 %
PAB-O	37 %	46 %		52 %	38 %
PAB-V	38 %	42 %	51 %	46 %	47 %
SMA	142 %	68 %	115 %	49 %	128 %
SOP			28 %	46 %	45 %
Yhteensä	77 %	50 %	55 %	49 %	58 %

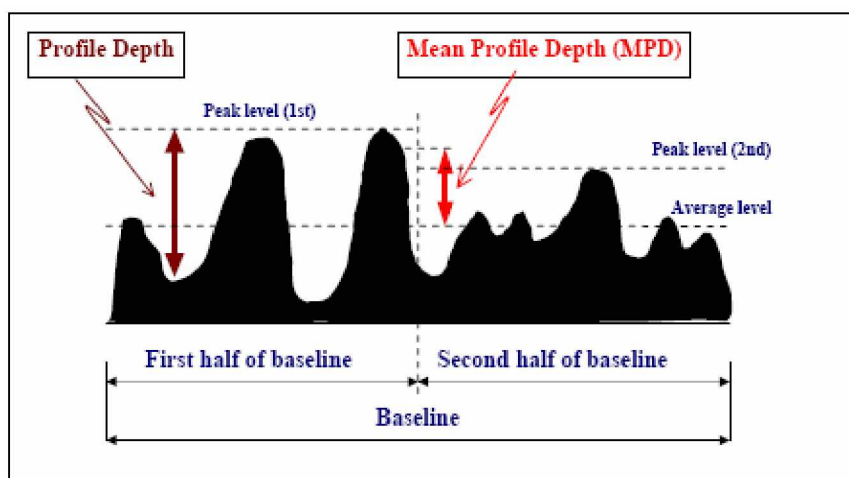
Megakarkeus

Päällystetyyppi	VT	KT	ST	YT	Yhteensä
AB	0.35	0.34	0.34	0.34	0.34
PAB-B	0.33	0.38	0.38	0.38	0.37
PAB-O	0.32	0.28		0.37	0.32
PAB-V	0.41	0.37	0.41	0.41	0.41
SMA	0.44	0.43	0.38	0.41	0.43
SOP			0.33	0.45	0.44
Yhteensä	0.37	0.36	0.38	0.38	0.38

Makrokarkeuden mittaaminen

Makrokarkeudesta on käytössä kaksi tunnuslukua, jotka ovat profiilin keskisyvyys, MPD, ja profiilin tehollinen syvyys, RMS.

MPD mitataan yleensä jatkuvana molemmista ajourista ja ajourien keskeltä. Tämä tunnusluku on ISO-standardin 13473-1 mukainen. Makrokarkeuden mittauksessa tuotetaan 100 mm jaksoille pituussuuntainen profiili, joka ensin suodatetaan ja kaltevuuskorjataan ja sen jälkeen jaetaan kahteen yhtä pitkään osaan. Näille osille tuotetaan huipun ja regressiolla saadun keskitason välien etäisyys. Saatu tunnusluku on profiilin keskisyvyys (MPD = Mean Profile Depth).



Kuva 1. Makrokarkeuden (Mean Profile Depth) laskentaperiaate. $MPD = (Peak1 - Peak2) / 2 - Average$.

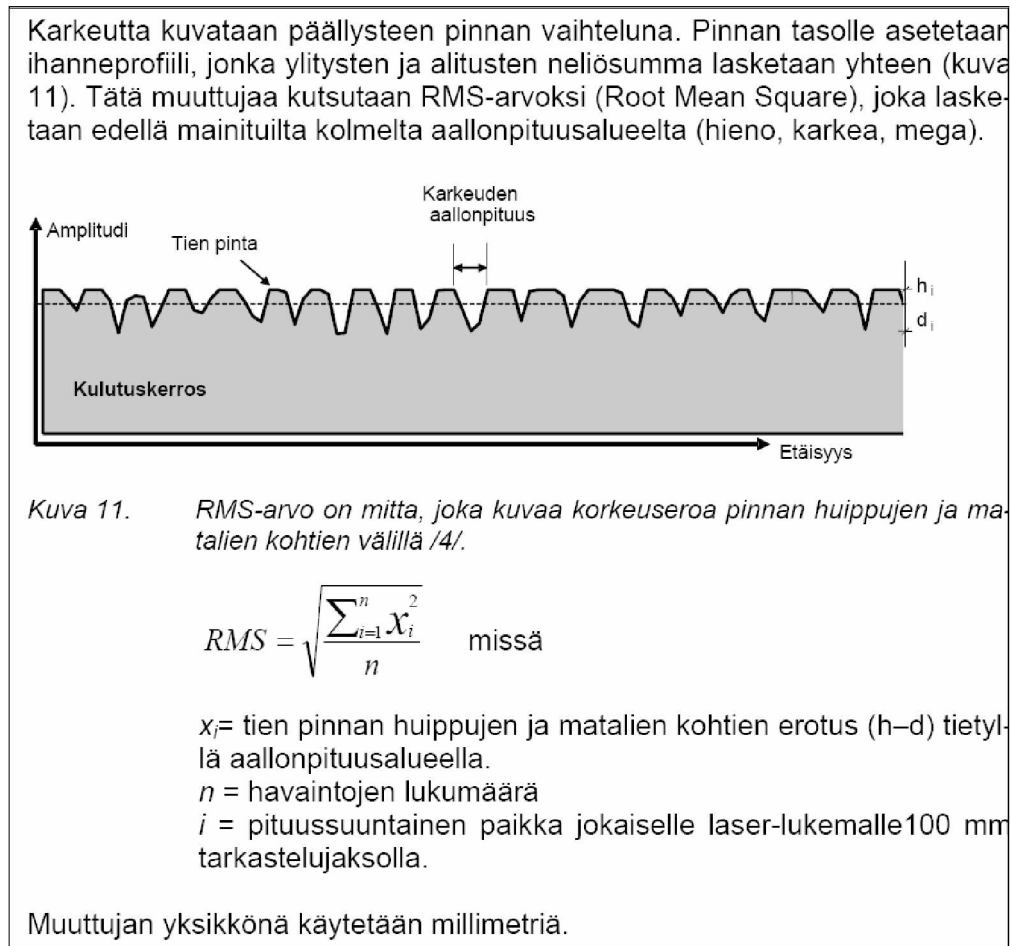
Saaduista MPD-arvoista tuotetaan keskiarvot (ja keskihajonta) halutulle raportointivälille. Tunnusluvun tuottamisen tarkemmat ohjeet on esitetty standardissa. Profiilin keskisyvyyden laskenta sisältää pituusprofiilin mittaamisen jälkeen seuraavat vaiheet:

- Transienttien eliminointi. Väärät, profiiliin kuulumattomat havainnot karsitaan pois.
- Ylipäästösuodatus. Ellei kaltevuuskorjaus ole käytössä, niin tehdään korkeapäästösuodatus siten, että yli 100 mm aallonpituusalueen data suodatetaan pois. (Huom. korkeapäästö liittyy taajuuteen, joka on käänteinen aallonpituuteen nähden).
- Alipäästösuodatus. Suodatetaan 2.5 mm matalamman aallonpituusalueen data pois.
- Perusarvon valinta. Valitaan laskennan kohteena oleva 100 mm:n jakso ja sille karkeuden perusarvo.
- Kaltevuuskorjaus. Eliminoidaan kaltevuuden vaikutus. (Vaihtoehto ylipäästösuodatukselle).
- Huippukohtien määrittäminen. Haetaan kummankin 50 mm palasen karkeuksien huippukohdat.

Tuotetaan MPD vähentämällä kummankin huipun keskiarvosta perusarvo.

Toinen makrokarkeuden tunnusluku on profiilin tehollinen syvyys, RMS-karkeus, joka kuvaa tien pinnan pystysuuntaista poikkeamaa todellisesta tien pinnasta määritetyillä aallonpituuksilla. RMS-arvo on profiilin vaihtelun geometrinen keskiarvo. Siitä käytetään myös nimitystä tehollinen arvo, mitä käytetään vastaavalle termille sähkötekniikassa kun lasketaan tehollista jännitettä.

Kirjallisuudessa käsitellään useimmiten MPD-arvoa, mutta joskus viitataan myös RMS-arvoon. Tutkimuksissa ei yleensä ole esitetty molempia.



Kuva 2. Tehollisen karkeuden laskentaperiaate.[51].

Profiilin tehollisen syvyyden ja keskisyvyyden välisestä riippuvuudesta ei ole kovin paljon lähteitä. Lundin yliopistossa on tehty yksi opinnäytetyö tästä suhteesta, mutta sille ei saatu kovin merkittävää yhteyttä. Tehollinen syvyys kuvaa pinnan vertikaalivaihtelun tasoa ja profiilin keskisyvyys kuvaa pinnasta ylöspäin suuntautuvien karkeuspiikkien tasoa.

Vierintävastusmittauksia 2004

Vuonna 2004 tehtyjen vierintävastusmittausten (coast-down) perusteella saatuja vierintävastuksen arvoja henkilö- ja kuorma-autolle pituuskaltevuudeltaan tasaisella kohteella KT 54 tieosa 014.

Ajoneuvo	Massa	Vierintävastuskertoimet		Ilmanvastus
		Vakio	Nopeustekijä	Tehollinen otsapinta-ala (otsapinta-alan ja muotokertoimen tulo) [m ²]
	[t]		[s/m]	
Kuorma-auto + varsinainen perävanu	60.7	0.0068	0	10,98
Kuorma-auto + varsinainen perävanu	19.4	0.00750	0	9.71
Henkilöauto	1.6	0.00819	0.00032	0.58

Laskelma vierintävastuksen muutoksen vaikutuksesta polttoaineen kulutuksen muutokseen henkilöautolla ja raskaalla autolla.

10 %:n vierintävastusmuutoksen aiheuttama polttoaineenkulutusmuutos

Tutkimus Polttoaineenkulutusmuutos

Ulkomaiset tutkimukset (Lampinen /10/)		[%]
- henkilöauto		2
- raskas auto (ei tietoa ominaisuuksista eikä massasta)		2.5
Suomalainen ajoneuvosimulointitutkimus		[%]
- henkilöauto		1.8 – 3.8
- ajoneuvoyhdistelmä		
o kuormattu,	massa 60 t	5.8 – 6.6
o osakuormattu,	massa 40 t	4.8 – 6.6
o kuormaamaton,	massa 20 t	3.1 – 5.0

Melun syntymekanismit

Ajoneuvojen melun lähteet voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: rengasmeluun, aerodynaamiseen meluun ja voimanlähteen meluun. Rengasmelu on näistä se osa, joka liittyy eniten tien pinnan ominaisuuksiin. Rengasmelun synty tapahtuma on monimutkainen ilmiö, jonka kaikkien mekanismien osuutta tai merkitystä ei kokonaismelun kannalta vielä täysin tunneta. Syntymekanismit voidaan jakaa kahteen pääryhmään: rakenteellisiin ja aerodynaamisiin, niiden syntyperiaatteen mukaan. Mekanismit (Sandbergin mukaan) on lueteltu taulukossa 5.1.

Rakenteelliset, mekaaniset värähtelymekanismit voidaan jakaa iskuista aiheutuviin, lähinnä radiaalisiin, värähtelyihin sekä kitkasta eli hystereesistä ja adheesiosta aiheutuviin värähtelyihin, jotka ovat lähinnä tangentialisia värähtelyjä.

Kuviopalan iskussa renkaan kuviopala tai muu osa, kuten nasta, iskeytyy tienpintaan aiheuttaen radiaalisia värähtelyjä, jotka leviävät tangentialisina värähtelyinä renkaan pinnassa ja vyörakenteessa, leviten renkaan kylkiin. Toisena iskuvärähtelyn tyyppinä on tienpinnan karkeudesta aiheutuvat iskut, jonka mekanismi on sama kuin kuviopalan iskussa, mutta jossa tienpinnan vaihtelu ”vasaroi” renkaan pintaa johtoreunan puolella ja vastaavasti vapauttaa pinnan jättöreunan puolella. Iskut ilmenevät tietyllä taajuudella, kuviopalojen välisen etäisyyden, tien pinnan karkeuden sekä ajoneuvon nopeuden mukaan. Kolmas iskusta aiheutuva renkaan värähtely syntyy kun rengas painautuu kasaan johtoreunalla ja vapautuu jättöreunalla aiheuttaen värähtelyjä renkaan vyö- ja runkorakenteisiin. Tämä tapahtuu myös sileällä tienpinnalla [6,24].

Kitkan aiheuttamat värähtelyt ovat lähinnä tangentialisia. Takertumisluiskahdustapahtumassa (stick-slip) kuviopalat liikkuvat suhteessa tienpintaan aiheuttaen tangentialista renkaan värähtelyä. Kulutuspinnan ja tien välinen kitka voidaan jakaa kahteen osaan, adheesioon ja hystereesiin. Adheesion eli takertumisen kannalta on merkittävää, millainen tienpinnan mikrorakenne on. Renkaan ja tien suhteellisen luiskahduksen/liukumisen aikana adheesiositeet tien mikrorakenteiden ja renkaan kuviopalojen välillä revähtävät erilleen, jolloin kumi voi vapaasti liukua tienpintaa pitkin. Hystereesissä kontaktialueen karkea tienpinta painautuu renkaan kuviopalaan. Kun kuviopala liukuu, se kasaantuu johtoreunan puolelta tienpinnan epä säännöllisiin rosioihin ja rikkoo kontaktin kuviopalan ja tienpinnan profiilin alaspäin johtavan luiskan välillä.

Puhtaalla tienpinnalla ja riittävän lämpötilan vallitessa kuviopalat takertuvat tienpintaan kiinni ja sen irrottamiseen tarvitaan voimaa, joka aiheuttaa takertumisenapsahdus värähtelyn. Irrotusvoima venyttää kumia, minkä seurauksena kuviopala värähtelee radiaalisesti kun irtoaminen on tapahtunut [6,24].

Aerodynaamisia värähtelymekanismeja ovat kaikki ilman liikkeeseen liittyvät mekanismit: turbulenssi, ilman kompressoituminen, Helmholtz- ja pilliresonanssi. Perusturbulenssi syntyy kun rengas edetessään vaakasuunnassa syrjäyttää ilmaa ja saa aikaan turbulenttisia pyörteitä. Toinen mekanismi, joka aiheuttaa turbulenttisia pyörteitä on kun kuviopalat ”kauhovat” ilmaa renkaan pyöriessä. Tämä on verrannollinen nopeuden kuudenteen potenssiin ja tulee merkittäväksi vasta suurilla nopeuksilla.

Pyörivä rengas syrjäyttää ilmaa, kun se muovautuu kontaktipinnasta. Tuloreunan puolella ilma kompressoituu/pumppautuu renkaan ja tienpinnan onkaloihin/lmatakuihin, ja sitten purkautuu, aiheuttaen melua 1-3 kHz taajuudella. Vastaavasti renkaan jättöreunan puolella melua syntyy, kun onkaloihin syntyvään alipaineeseen syöksyy ilmaa [6,24].

Rengasmelussa Helmholtz-resonanssi syntyy renkaan jättöreunalla siten, että ura kuviopalojen välillä on jousi, ja massana on tien pinnasta irronneen kuviopalan ja tien välinen ilmamassa. Herätteenä ovat kuviopalan värähtely ja ilman liike [6,24].

Taulukko 1. Rengasmelun syntymekanismit [6].

Mekanismit		Mekanismin kuvaus
Syntymekanismi	Rakenteesta aiheutuva värähtely	1A. Kulutuspinna. Kulutuspinnan kuviot iskeytyvät tien pintaan aiheuttaen säteittäistä värähtelyä kulutuspinnaan ja vyöhön.
		1B. Karkeus. Tien karkeus vaikuttaa renkaaseen aiheuttaen myös säteittäistä värähtelyä kulutuspinnaan ja vyöhön.
		1C. Renkaan kokoonpuristuminen aiheuttaa värähtelyä sen rakenteissa.
		2A Slick-slip. Kulutuspinnan osa liikkuu suhteessa tien pintaan ja aiheuttaa tangentiaalista värähtelyä.
	Aerodynaaminen	2B. Kumin ja tienpinnan välinen kosketus (adheesio) aiheuttaa tangentiaalista tai radiaalista värähtelyä.
		3A: Ilmanvirtaus. Rengas siirtää ilmaa vierieksään.
Vahvistusmekanismi	3. Ilman liikkeisiin liittyvä	3B. Ilman pumppaus. Ilmaa pumppautuu kulutuspinnan lamellien väleisistä.
		3C. Putkiresonanssi. Kulutuspinnan lamellien väleisistä siirtyvä ilma resonoi (l/2).
		3D. Helmholtz-resonanssi. Ilmaa siirtyy renkaan pinnan raoista sisään/ulos ja se vahvistuu resonoinnissa.
	4. Torviefekti	4. Rengas ja tienpinta muodostavat torven, joka vahvistaa siinä synnyttää äänen voimakkuutta.
		5A. Huokoisen päällysteen huokoset imevät ääntä ja vaimentavat sitä.
		5B. Sama kuin edellä, mutta vaikutus ulottuu kauemmas.
	6. Mekaaninen vastus	6A. Tien pinta vaikuttaa renkaaseen renkaan/tien jäykkyysuhteesta riippuen.
		6B. Osa renkaan värähtelyistä johtuu tiehen aiheuttaen ääntä.
	7. Rengasresonanssi	7A. Renkaan vyön resonanssit.
		7B. Renkaan pinnan tyhjien kohtien resonanssit.

Pilliresonanssi ilmenee seisovina aaltolina renkaan pinnoitteen urassa. Jokainen rengaskuvio saa suhteellisen sileän tienpinnan kanssa aikaan pilliresonanssi-ilmiön. Resonanssitaajuuudet riippuvat geometriasta, mutta eivät renkaan pyörimisnopeudesta [6,24].

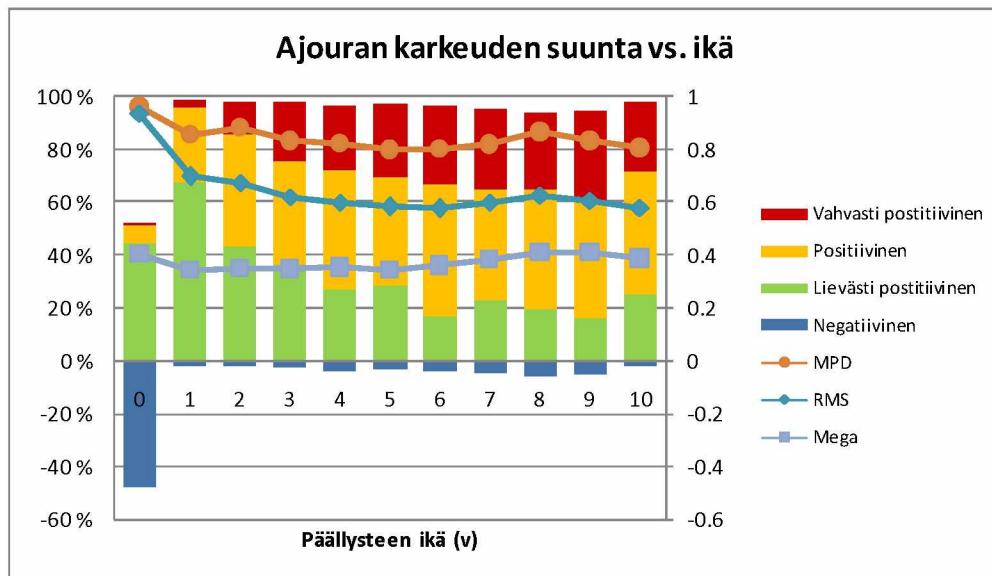
Rengasmelun syntymekanismien lisäksi melun suuruuteen vaikuttavat melua vaimentavat tai vahvistavat tekijät. Näistä vahvistumis/vaimennustekijöistä käytetään nimityksiä torvi-ilmiö ja mekaaninen impedanssi. Rengas ja tienpinta muodostavat torven sekä tulo- että jättöreunan puolelle. Suurin osa rengasmelusta muodostuu juuri torven kurkkuosassa, jonka eksponentiaalisesti laajeneva akustinen torvi vahvistaa meluääntä. Mekaanisella impedanssilla tarkoitetaan tienpinnan jäykkyyden vaikutusta meluun. Sitä ei ole kovin paljoa tutkittu, mutta on kuitenkin näyttöä siitä, että kovempi pinta aiheuttaa enemmän melua kuin pehmeämpi. [6,24].

Rengasmelun huippukohta osuu äänitaajuusalueella noin yhden kHz:n kohdalle, jolle ihmisen kuulon on todettu olevan herkimmillään. Rengasmelun määrä riippuu ajoneuvudesta ja sen osuus ylittää vakionopeudella ajettaessa moottorimelun kevyillä ajoneuvoilla nopeusarvoilla 15–35 km/h ja raskailla ajoneuvoilla 30–50 km/h [6].

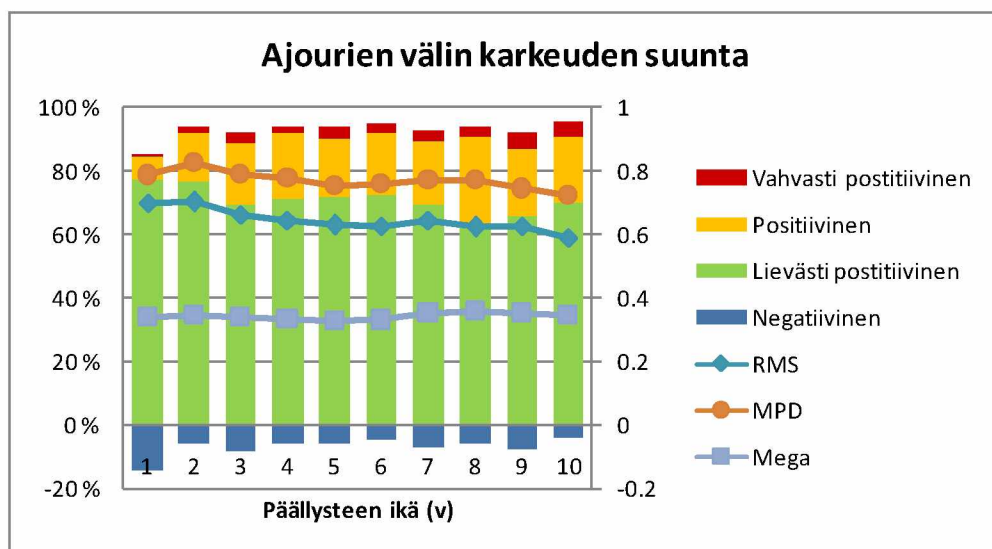
Taulukko 2. Tien ominaisuuksien vaikutus rengasmelun syntymekanismeihin [25].

Mekanismi	Tien ominaisuus		
	Pinta	Huokoisuus	Mekaaninen impedanssi
Värähtelyt	vahva	heikko	vahva
Renkaan kyljen värähtelyt	vahva	heikko	vahva
Takertumis-liuku	vahva	välillinen	?
Takertumis-napsahdus	vahva	välillinen	?
Ilman turbulenssi	heikko	heikko	heikko
Renkaan sisäiset resonanssit	välillinen	heikko	?
Ilman pumppautuminen	välillinen	vahva	?
Renkaan profiilin resonanssit	välillinen	vahva	?
Torvi-ilmiö	heikko	vahva	heikko
Rengasmelun absorptio	heikko	vahva	heikko
Moottorimelun absorptio	heikko	vahva	heikko

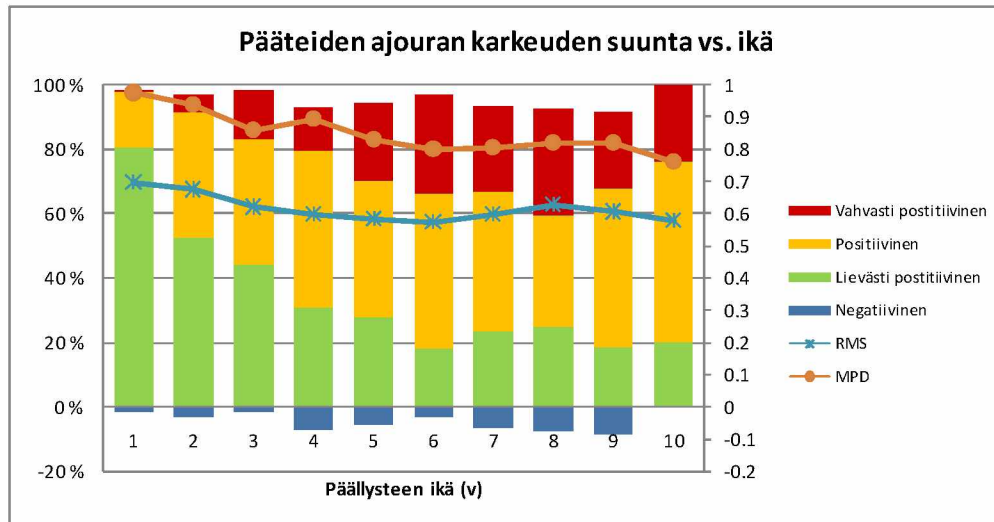
Mittausten analysointia



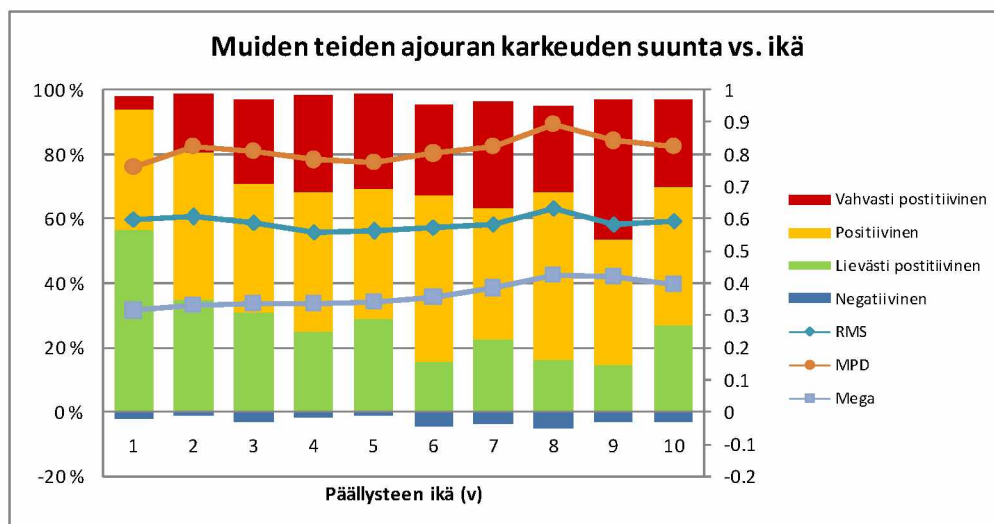
Kuva 1. Karkeuksien analysointia kesämittausten 2009 tuloksista. Oikean ajouran karkeuskeskiarvoja ja sen suuntautuneisuutta päällysteen iän mukaan. Nollavuoden aineisto uusien päällysteiden laatumittauksista. Suuntautuneisuuden luokittelussa käytetty raja-arvoja 0, 30 ja 50 %. Uusilla päällysteillä on paljon negatiivisesti suuntautunutta karkeutta, mutta se häviää jo ensimmäisen talven jälkeen. Positiivinen suunta kasvaa päällysteen ikääntyessä.



Kuva 2. Karkeuksien analysointia kesämittausten 2009 tuloksista. Ajourien välisen alueen karkeuskeskiarvoja ja sen suuntautuneisuutta päällysteen iän mukaan. Suuntautuneisuuden luokittelussa käytetty raja-arvoja 0, 30 ja 50 %. Ajourien välissä karkeus ei muutu niin voimakkaasti kuin urissa.



Kuva 3. Karkeuksien analysointia kesämittausten 2009 tuloksista. Päätteiden oikean ajouran karkeuskeskiarvoja ja sen suuntautuneisuutta päällysteen iän mukaan. Suuntautuneisuuden luokittelussa käytetty raja-arvoja 0, 30 ja 50 %.

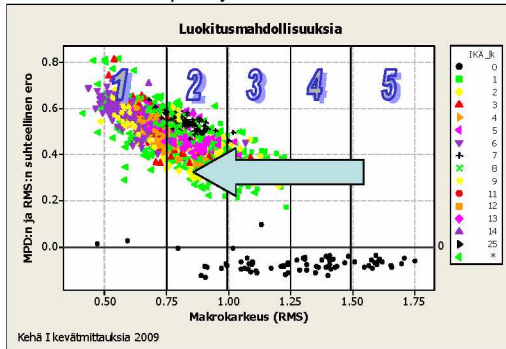


Kuva 4. Karkeuksien analysointia kesämittausten 2009 tuloksista. Muiden teiden oikean ajouran karkeuskeskiarvoja ja sen suuntautuneisuutta päällysteen iän mukaan. Suuntautuneisuuden luokittelussa käytetty raja-arvoja 0, 30 ja 50 %.

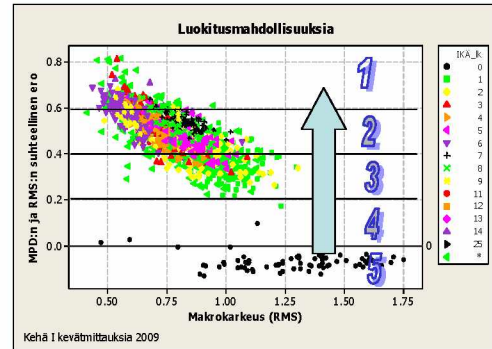
Makrokarkeuden muita kuntoluokitusvaihtoehtoja

Pääkriteerit ovat, että luokituksen tulisi kattaa päällysteen koko elinkaari, olla samansuuntainen kuin miten päällysteen huonokuntoisuus kehittyy sekä sen tulisi toimia myös uusille päällysteille.

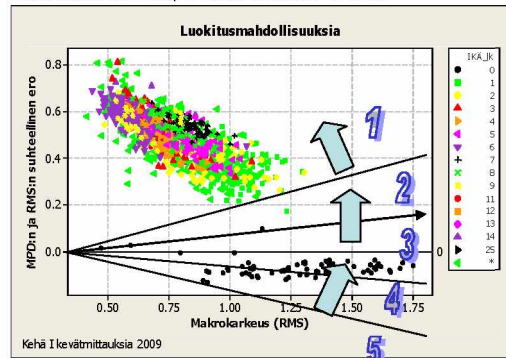
Ei toimi uusilla päällysteillä



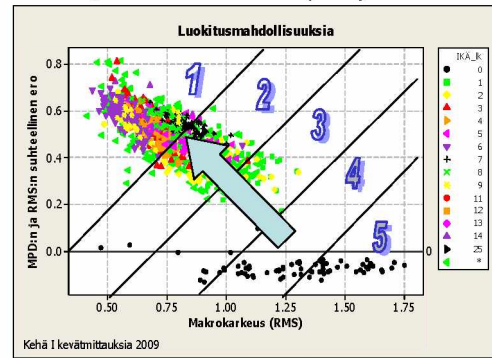
Saattaisi toimia, muttei ole kohtisuorassa huonouden kehittymisen kanssa



Saattaisi toimia, mutta skaala ei riitä



Kohtisuorassa huonouden kehittymisen kanssa, muttei toimi uusille päällysteille



Kuva 1. Makrokarkeuden luokitteluvaihtoehtoja.

Mittautietojen talletusformaatti

Tieosoitetieto								Mittautiedot				Hienomakro			Karkea makro (RMS)			Karkea makro (MPD)		
Tie	Ajorata	Suunta	Kaista	Aosa	Aet	Losa	Let	Mittausaika	Kev/kesä	Mittausnopeus	Out Track	H_makro_V	H_makro_K	H_makro_O	K_makro_V_RMS	K_makro_K_RMS	K_makro_O_RMS	K_makro_V_MPD	K_makro_K_MPD	K_makro_O_MPD
1	1	1	1	003	0	003	100	5.5.2010	1	45.7	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	100	003	200	5.5.2010	1	55.6	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	200	003	300	5.5.2010	1	75.6	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	300	003	400	5.5.2010	1	85.5	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	400	003	500	5.5.2010	1	90.4	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	500	003	600	5.5.2010	1	94.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	600	003	700	5.5.2010	1	89.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	700	003	800	5.5.2010	1	80.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	800	003	900	5.5.2010	1	84.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	900	003	1000	5.5.2010	1	95.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	1000	003	1100	5.5.2010	1	93.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	1100	003	1200	5.5.2010	1	95.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	1200	003	1300	5.5.2010	1	80.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	1300	003	1400	5.5.2010	1	90.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	1400	003	1500	5.5.2010	1	91.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	1500	003	1600	5.5.2010	1	100.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	1600	003	1700	5.5.2010	1	94.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	1700	003	1800	5.5.2010	1	94.0	1	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	1800	003	1900	5.5.2010	1	100.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	1900	003	2000	5.5.2010	1	100.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	2000	003	2100	5.5.2010	1	98.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	2100	003	2200	5.5.2010	1	100.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	2200	003	2300	5.5.2010	1	96.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	2300	003	2400	5.5.2010	1	94.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	2400	003	2500	5.5.2010	1	100.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	2500	003	2600	5.5.2010	1	86.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	2600	003	2700	5.5.2010	1	98.0	1	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	2700	003	2800	5.5.2010	1	91.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	2800	003	2900	5.5.2010	1	98.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	2900	003	3000	5.5.2010	1	81.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	3000	003	3100	5.5.2010	1	100.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	3100	003	3200	5.5.2010	1	97.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx
1	1	1	1	003	3200	003	3300	5.5.2010	1	94.0	0	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx	X.xxx

jatkuu seuraavalle sivulle..

[illegible]

Liik
enne
vira
sto

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-001-9

www.liikennevirasto.fi